

IPC-SM-785

Руководящие указания по ускоренным методам испытаний на надежность паяных соединений технологии поверхностного монтажа

(Перевод на русский язык, редакция 11.2007)

Регулирующей версией является версия на английском языке. В случае разночтений необходимо руководствоваться версией на английском языке.

IPC-SM-785
Ноябрь 1992

Руководящие указания разработаны ассоциацией IPC

Перевод выполнен:
ЗАО Предприятие ОСТЕК
121467, РФ, г. Москва,
ул. Молдавская, д.5, стр.2
тел.: (495) 788-44-44
факс: (495) 788-44-42
E-mail: info@ostec-smt.ru
Интернет: www.ostec-smt.ru

Содержание

Рисунки

Таблицы

Руководящие указания по ускоренным методам испытаний на надежность паяных соединений технологии поверхностного монтажа

1.0 СОСТАВ ДОКУМЕНТА

В данном документе приводятся руководящие указания по ускоренным методам испытаний на надежность паяных соединений технологии поверхностного монтажа, а также методика интерпретации и экстраполяции результатов этих ускоренных испытаний на реальные условия эксплуатации электронных сборок. Для разъяснения вопросов, связанных с ускоренными испытаниями, приводится справочная и проектно-конструкторская информация.

1.1 Цель

Ускоренные испытания на надежность проводятся с целью проверки способности конструкции и технологических процессов производства/сборки обеспечивать достижение заданных характеристик изделия. Данные руководящие указания обеспечивают достаточную унификацию и достоверность ускоренных испытаний на надежность, что позволяет:

- осуществлять сравнение результатов, полученных по различным программам испытаний
- обобщать представления о технической сути основных проблем, влияющих на обеспечение надежности конструкции
- выполнять аналитическое прогнозирование надежности на основании обобщенной базы данных и их технической интерпретации
- понизить расходы и затраты времени на испытания на каждом шаге повторного проектирования
- предложить целесообразные решения, исключающие необходимость проводить чрезмерно длительные испытания для проверки надежности изделий, подвергающихся воздействию жестких условий эксплуатации либо обладающих низкой отказоустойчивостью.

1.2 Структура документа

Данный документ изложен таким образом, чтобы предоставить читателю непротиворечивые сведения о различных аспектах надежности и дать определения соответствующих параметров. Каждый раздел выполняет определенную функцию при последовательном описании надежности. В необходимых местах документ снабжен ссылками, по которым можно получить дополнительную информацию.

• *Раздел 3, "Требования"*

В этом разделе приводится обзор общих представлений о надежности и всех характеристик, которые должны приниматься во внимание при оценке конструкции изделия. В обзор включены определения соответствующих терминов, а также обобщенные модели усталостной долговечности и вероятности появления отказа, последовательность технологических операций производства, характеристика условий эксплуатации и методология испытаний.

• *Раздел 4, "Усталостные характеристики паяных соединений поверхностного монтажа и их прогнозирование"*

В этом разделе рассматриваются модели усталостной долговечности паяных соединений, включая их поведение при воздействии многократных циклических нагрузок в условиях значительного возрастания температуры или высокочастотных циклов при низких температурах. Кроме того, обсуждаются коэффициенты ускорения, преобразования ускорения и приводятся статистические расчеты.

• *Раздел 5, "Проектирование с учетом требований к надежности паяных соединений"*

В этом разделе приводятся подробные сведения о конструктивных параметрах, оказывающих основное воздействие на усталостную надежность паяных соединений. Рассматриваются все вопросы, относящиеся к формированию паяного соединения, включая размер компонента, жесткость выводов, коэффициент температурного расширения, однородность паяного соединения, а также состав припоя, кристаллическая структура и воздействие, оказываемое влагозащитным покрытием или деформируемыми слоями на систему поверхностного монтажа.

• *Раздел 6, "Технологические процессы"*

В этом разделе рассматривается взаимосвязь процессов сборки и формирования соединений, включая их контроль и проверку, а также имеющиеся или потенциальные дефекты, возникающие в первоначальных процессах либо в ходе доработки, восстановления или ремонта. Обсуждаются свойства припоя (включая его объем), материалов компонентов, печатных плат, адгезивов и влагозащитных покрытий в части их взаимодействия, а также влияние, которое оказывают эти характеристики на технологические процессы.

• *Раздел 7, "Ускоренные испытания на надежность"*

Этот раздел посвящен задачам ускоренного тестирования по достижению состояния отказа в кратчайшее время с использованием методик, предназначенных для моделирования условий эксплуатации с целью определения соответствующего доверительного уровня рабочих характеристик изделия. Рассматриваются различные виды циклических нагрузок и устанавливается их связь с механизмами разрушения. Кроме того, обсуждается необходимость разработки стратегии, включающей план испытаний, методологию формирования выборки, испытательное оборудование и анализ характера отказов.

• *Приложение А, "Пошаговый пример"*

В этом разделе даются пояснения к применению принципов, подробно изложенных в материалах данной публикации. Приводятся численные примеры, выявляющие взаимоотношение различных параметров.

• *Приложение В, "Литература"*

В этом разделе приводятся ссылки на опубликованные издания, имеющие отношение к надежности паяных соединений и упоминаемые в тексте данного документа. Ссылки содержат сведения о наименовании, авторе и издателе публикаций.

• *Приложение С, "Библиография"*

В этом разделе приводятся ссылки на дополнительную опубликованную литературу, которая может оказаться полезной для специалиста - практика. Ссылки распределены по трем основным направлениям:

1) Ускоренные испытания на долговечность

2) Металлургия паяных соединений и травление

3) Воздействие вибрации и ударов

2.0 ДЕЙСТВУЮЩИЕ НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Перечисленные ниже изданные действующие документы составляют часть настоящих технических условий в оговоренном здесь объеме.

2.1 Стандарты IPC[1] (Международная ассоциация производителей электроники)

IPC-T-50 "Термины и определения по монтажу и конструированию электронных сборок"

IPC-PC-90 "Использование статистического управления процессами, общие требования"

IPC-TM-650 "Руководство по выбору методов контроля печатных плат"

IPC-ET-652 "Электрические испытания несобранных печатных плат, руководящие указания и технические требования"

IPC-R-700 "Модификация, ремонт и восстановление печатных плат и сборок, рекомендуемые нормативы"

IPC-TA-720 "Технологическая оценка ламинатов"

IPC-SM-782 "Руководство по проектированию контактных площадок плат поверхностного монтажа (конфигурации и правила проектирования)"

IPC-SM-786 "Рекомендуемая методика обращения с пластиковыми корпусами микросхем, чувствительными к влаге"

IPC-MS-810 "Серийное изготовление микрошлифов, руководящие указания"

IPC-S-816 "Руководящие указания и контрольные таблицы по процессам технологии поверхностного монтажа"

2.2 Объединенные промышленные стандарты[1]

J-STD-001 "Требования к пайке электрических и электронных сборок"

J-STD-002 "Тесты на паяемость выводов компонентов, контактных поверхностей и проводов"

J-STD-003 "Контроль паяемости печатных плат"

2.3 Военные стандарты

MIL-HDBK-217

MIL-STD-810

2.4 Другие публикации

Американское общество по испытаниям и материалам

ASTM E340-68 "Стандартные методы травления макроструктуры металлов и сплавов"

ASTM E407-70 "Стандартные методы травления микроструктуры металлов и сплавов"

Международный институт олова ITRI

ITRI, публикация № 580 Металлография олова и сплавов на основе олова

ITRI, публикация № 708 Металлография паяных соединений в электронных приборах

3.0 ТРЕБОВАНИЯ

Надежность присоединения методом пайки компонентов поверхностного монтажа к подложкам печатных плат требует пристального внимания как на стадии проектирования, так и во время производства. Во время эксплуатации паяные соединения поверхностного монтажа (ПМ) могут подвергаться нагрузкам самого различного характера, которые приводят к преждевременному отказу недостаточно продуманной конструкции. Приведенные ниже режимы нагружения могут встречаться как самостоятельно, так и последовательно либо одновременно:

a) циклическое относительное температурное расширение,

b) вибрация (при транспортировке),

c) тепловой удар (быстрое изменение температуры, вызывающее динамические неравномерные деформации) при охлаждении после операции пайки или из-за жестких условий эксплуатации,

d) механический удар (высокое ускорение) из-за жестких условий эксплуатации или случайного нарушения установленных режимов.

Несмотря на то, что возникновение вибрации, теплового удара и механических толчков в практических случаях возможно, они являются скорее исключением, чем нормой. Основным механизмом, определяющим надежность паяных соединений ПМ, является циклическое относительное температурное расширение/сжатие, вызывающее усталостное разрушение. Следует отметить, что устойчивость к разрушению, вызванному вибрационной усталостью, тепловым ударом и механическим ударом зависит в основном от прочности паяного соединения; однако, в отношении устойчивости к разрушению от усталости из-за циклического воздействия температуры дело обстоит иначе.

Эти различия температурного расширения возникают в результате изменения температур из-за диссипации энергии вовнутрь компонента и различия коэффициентов теплового расширения (КТР) в сочетании с внутренними или внешними колебаниями температуры системы, обусловленными колебаниями нагрузки компонента или системы либо циклами включения/выключения, суточными циклами или сезонными изменениями внешних условий. При работе паяные соединения ПМ могут подвергаться значительным циклическим деформациям из-за различного температурного расширения материалов:

1. компонентов поверхностного монтажа и подложек, к которым они припаяны;

2. припоя и материалов (компонента, вывода, подложки), с которыми осуществляется паяное соединение.

Для обеспечения ожидаемых показателей надежности паяных соединений электронных сборок ПМ в заданных условиях эксплуатации необходимо подготовить общую базу данных надежности с помощью ускоренных испытаний на усталостное разрушение и подтвердить показатели надежности для конкретных областей применения.

1. Публикации можно приобрести в офисе IPC, 2215 Sanders Road, Northbrook, IL 60062-6135

В общем случае циклическое разрушение и усталостная долговечность при ускоренных испытаниях не эквивалентны наблюдающимся при эксплуатации из-за неустановившейся ползучести и релаксации напряжений в припое. Таким образом, чтобы воспользоваться результатами ускоренных испытаний на усталость, необходимо применить преобразование ускорения. Оно позволяет выполнять обоснованное сравнение результатов, полученных в различных условиях ускоренных испытаний, и, что более важно, экстраполировать результаты этих ускоренных испытаний для прогнозирования надежности изделия при его эксплуатации.

3.1 Термины и определения

Используемые в данном документе термины и определения соответствуют приведенным в стандарте IPC-T-50, за исключением оговоренных особо.

Примечание: Определения, отмеченные звездочкой (*), являются перепечаткой определений, приведенных в IPC-T-50.

3.1.1 Ускоренное испытание надежности

Испытание, в котором механизм (механизмы) разрушения, представляющий интерес, ускоряется с целью вызвать отказы за меньшее время, чем при обычной эксплуатации. Ускорение испытания достигается за счет сокращения периодов цикла и/или применения более жестких условий нагружения; однако, следует избегать появления посторонних механизмов разрушения. Характеристика долговечности может быть получена за счет применения соответствующих коэффициентов или преобразований ускорения.

3.1.2 Допустимая совокупная вероятность отказа Максимальный процент дефектов/отказов в конце срока службы, находящийся в допустимых пределах.

3.1.3 Кривая интенсивности отказов

Методика количественного определения надежности, графически отображающая зависимость интенсивности отказов от времени. Часто результаты распределяются вдоль U-образной линии, известной как кривая интенсивности отказов. На ней отчетливо видны три периода. Эти периоды отличаются по частоте отказов и по контуру, характеризующему причину отказов.

3.1.4 Тренировочные испытания

Выполняемое по стандартной методике испытание, в ходе которого готовое изделие подвергается воздействию нормальных, возможно самых неблагоприятных, но все же реалистических условий эксплуатации. По своим целям оно напоминает пробный рейс корабля. Тренировка не является ускоренным испытанием на надежность.

3.1.5 Ползучесть

Неустановившаяся вязко-пластическая деформация, являющаяся функцией приложенной нагрузки.

3.1.6 Модель Коффина – Мэнсона

Прогнозирующая модель, связывающая количество циклов нагрузки до разрушения с приложенным напряжением пластической деформации.

3.1.7 Циклическое относительное расширение

Различия в расширении, развивающиеся из-за отличающихся коэффициентов теплового расширения и циклических изменений температуры в процессе эксплуатации или в ходе испытаний на стойкость к термоциклированию.

3.1.8 Циклический интервал температур/Размах Амплитуда температуры между максимальным и минимальным значениями, имеющими место в рабочих циклах эксплуатации или при испытаниях на стойкость к термоциклированию.

3.1.9 Расчетный срок службы Длительность эксплуатации единицы оборудования, подвергаемой воздействию предполагаемых условий окружающей среды с сохранением полной функциональности.

3.1.10 Отбраковочные испытания при воздействии окружающей среды (ESS) Испытания, использующие создаваемые окружающей средой нагрузки с целью вызвать перегрузку "слабых" элементов сборки до точки отказа для предотвращения попадания этих скрытых дефектов на место эксплуатации и возможных отказов на месте эксплуатации. Внешние условия, создающие эти нагрузки, могут быть или не быть связанными с условиями окружающей среды, воздействию которых изделие подвергается во время эксплуатации. Отказавшие элементы могут быть обнаружены и отремонтированы, заменены либо отбракованы; возможно также внесение изменений в конструкцию будущего изделия. Выполнение ESS не должно наносить значительных повреждений "нормальным" элементам в сборке. ESS не является ускоренным испытанием на надежность.

3.1.11 Ожидаемый расчетный ресурс

Срок службы изделия, задаваемый его разработчиком.

3.1.12 Показатель усталостной пластичности

Показатель, используемый в модели малоцикловой усталости Коффина-Мэнсона для определения характеристического наклона кривой, определяющей долговечность при циклическом нагружении в зависимости от энергии циклической вязко-пластической деформации.

3.1.13 Форсированные ускоренные испытания (HAST) Испытание в утяжеленном режиме, используемое для моделирования механизмов разрушения, связанных с коррозией под электрическим напряжением в сочетании с ускоряющим воздействием температуры и влажности. Испытания HAST могут использоваться применительно к компонентам и сборкам, но не являются ускоренным испытанием надежности паяных соединений.

3.1.14 Петля гистерезиса

График деформируемости паяных соединений, получаемый в цикле нагрузки от нуля до положительного максимума, затем через нуль до отрицательного максимума и обратно к нулю — площадь петли гистерезиса является мерой усталостного повреждения за один цикл.

3.1.15 Ранний отказ

Отказ во время тренировки, предварительных функциональных испытаний, и/или в начальный период эксплуатации, связанный преимущественно с технологическим процессом производства или проблемами, относящимися к качеству.

3.1.16 Способность к резервированию

Способность оборудования сохранять минимальный уровень функциональности, несмотря на наличие некоторых внутренних функциональных повреждений.

3.1.17 График Коффина – Мэнсона

Графическое представление, связывающее количество циклов нагрузки до разрушения с приложенным напряжением пластической деформации как при пластическом, так и при упругом поведении материала.

3.1.18 Максимальный диапазон пластических деформаций

Общий диапазон деформаций, получившийся после полной релаксации напряжений во время циклического воздействия тепловых или механических деформаций.

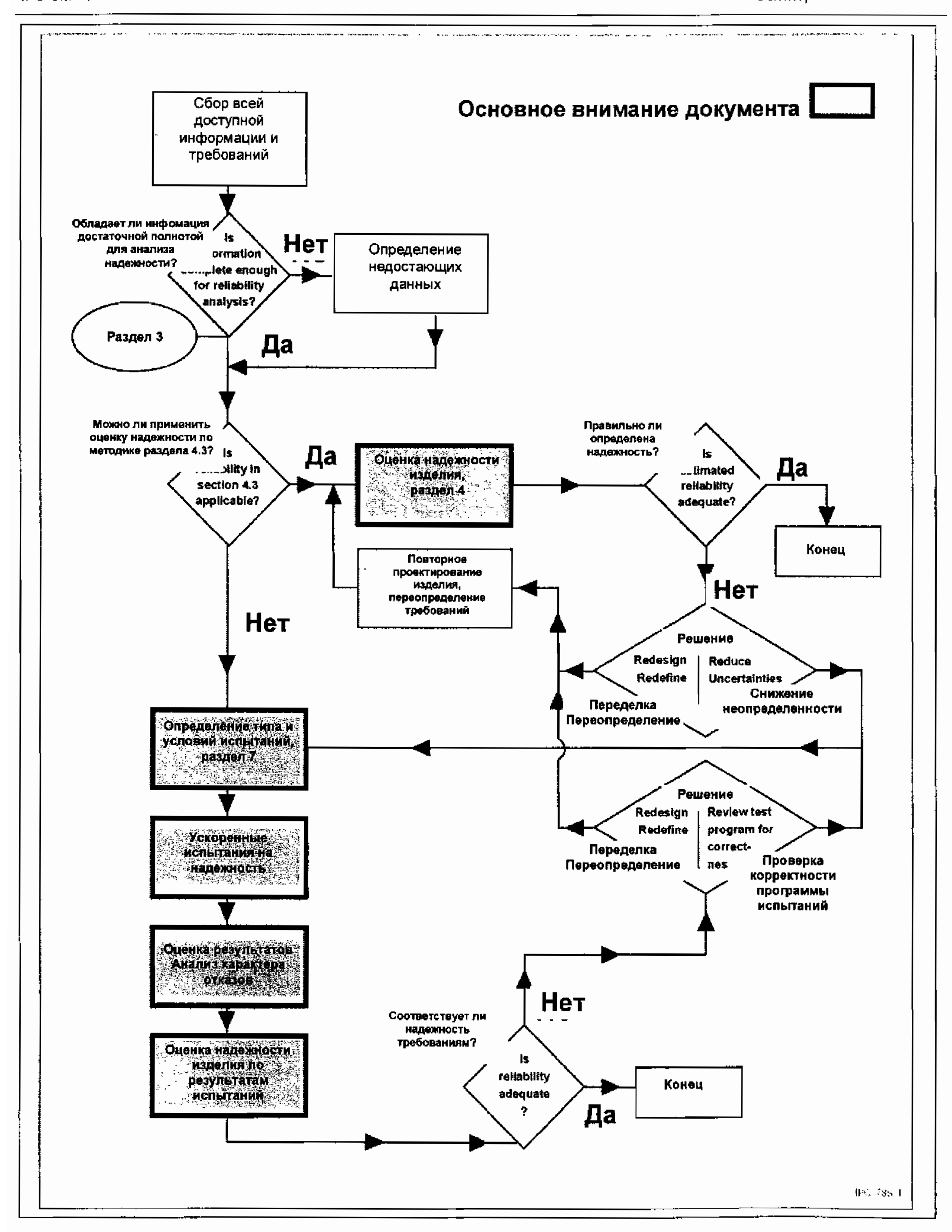


Рисунок 1 Блок-схема оценки надежности

3.1.19 Средняя усталостная долговечность

Время, за которое вышла из строя половина данной статистической выборки изделий.

3.1.20 Механический удар

Быстрая передача механической энергии системе, что приводит к значительному изменению нагрузки, скорости, ускорения или сдвига в пределах системы.

3.1.21 Квалификационные испытания процесса

Особые испытания, проводимые для подтверждения возможностей технологического процесса в плане соответствия производимого изделия требованиям технических условий.

3.1.22 Верификация процесса

Текущая оценка используемых в производстве изделия технологических процессов, обеспечивающая их оптимизацию или устранение отклонений от технических условий.

3.1.23 Случайное стационарное состояние

Период полезного срока службы, в течение которого появление отказов кажется случайным и происходит с небольшой скоростью, слабо зависящей от сложности изделия.

3.1.24 Надежность

Способность изделия функционировать в заданных условиях в течение определенного периода времени без превышения заданного уровня интенсивности отказов.

3.1.25 Крепление пайкой

Совокупность паяных соединений, связанная с компонентом.

3.1.26 Релаксация напряжений

Зависящее от времени ослабление напряженного состояния вследствие вязко-пластической деформации, являющейся функцией приложенного смещения.

3.1.27 Термоциклирование (см. 3.4.1)

Воздействие на сборку циклических изменений температуры при скорости изменения достаточно низкой, чтобы избежать теплового удара.

3.1.28 Тепловой удар (см. 3.4.3)

Воздействие на сборки быстрых изменений температуры, вызывающих динамические градиенты температуры, деформации и напряжения. Как установлено эмпирически, необходимы скорости изменения температуры, превосходящие 30°С/мин.

3.1.29 Вибрация

Периодическое, обычно упругое, колебательное движение структуры в противоположных направлениях относительно положения равновесия.

3.1.30 Плотность энергии вязко-пластической деформации

Мера передаваемой в циклически нагружаемую структуру энергии, определяемой границами петли гистерезиза на графике зависимости деформации от приложенного напряжения за единичный цикл нагрузки.

3.1.31 Износ

Процесс монотонного возрастания количества отказов по мере ухудшения свойств изделия из-за накопления усталостных повреждений.

3.1.32 Распределение Вейбулла

Статистическое описание распределения отказов изделия, используемое, главным образом, при описании состояний износа.

3.2 Понятие надежности и его интерпретация

В контексте данного документа большое значение приобретает рабочее определение надежности:

Надежность - это способность изделия (в данном документе изделиями являются паяные соединения поверхностного монтажа) функционировать в заданных условиях в течение определенного периода времени без превышения заданного уровня интенсивности отказов.

В этом определении подразумевается то обстоятельство, что надежность паяных соединений ПМ определяется по износу (усталости), в частности, на графике зависимости интенсивности отказов от времени ("кривая интенсивности отказов"). На Рисунке 2 показаны отдельные "U- образные" графики надежности для паяных соединений ПМ и для "типичного" незакрепленного электронного компонента. На Рисунке 3 показана эта же информация в виде графиков совокупной вероятности отказа для компонента и паяного соединения ПМ. Стойкость паяного соединения характеризуется, главным образом, правой восходящей частью кривой, где интенсивность отказов со временем быстро возрастает вследствие износа. Из этого следует непосредственный вывод, что качество производства не может повысить собственную надежность конструкции в данных условиях эксплуатации; однако, недостаточное качество производства может понизить заложенную при проектировании собственную надежность за счет возрастания интенсивности ранних отказов.

В ходе производства в параметры изделия привносится нестабильность. Эта нестабильность затрагивает диапазон всех свойств материалов, из которых состоит изделие, распространяясь на размеры деталей в силу допустимой погрешности, колебаний состава и неоднородностей, флуктуаций технологических параметров процесса и т. д. При высоком качестве производства эта нестабильность удерживается в пределах, делающих невозможным значительное ухудшение характеристик изделия. Понижение качества производства может привнести повышенную нестабильность и/или дефекты, которые могут значительно ухудшить характеристики изделия.

На эту нестабильность свойств изделия (материалы, обработка и т. д.) накладываются отклонения реальных условий эксплуатации, а также распределения надежности (усталостной стойкости). Даже для номинально идентичных изделий, подверженных воздействию идентичных условий нагрузки, наблюдается статистическое распределение отказов. Поскольку ускоренные испытания на надежность являются трудоемкими и дорогостоящими, они обычно проводятся на достаточно малом количестве образцов. Для учета неустойчивости характеристик типичного изделия и влияния этих переменных величин на надежность необходимо выполнить испытания достаточно большого количества образцов. В этих же целях могло бы послужить контролируемое введение искусственно созданных дефектов, предположительно оказывающих значительное влияние на надежность, но это практически труднодостижимо.

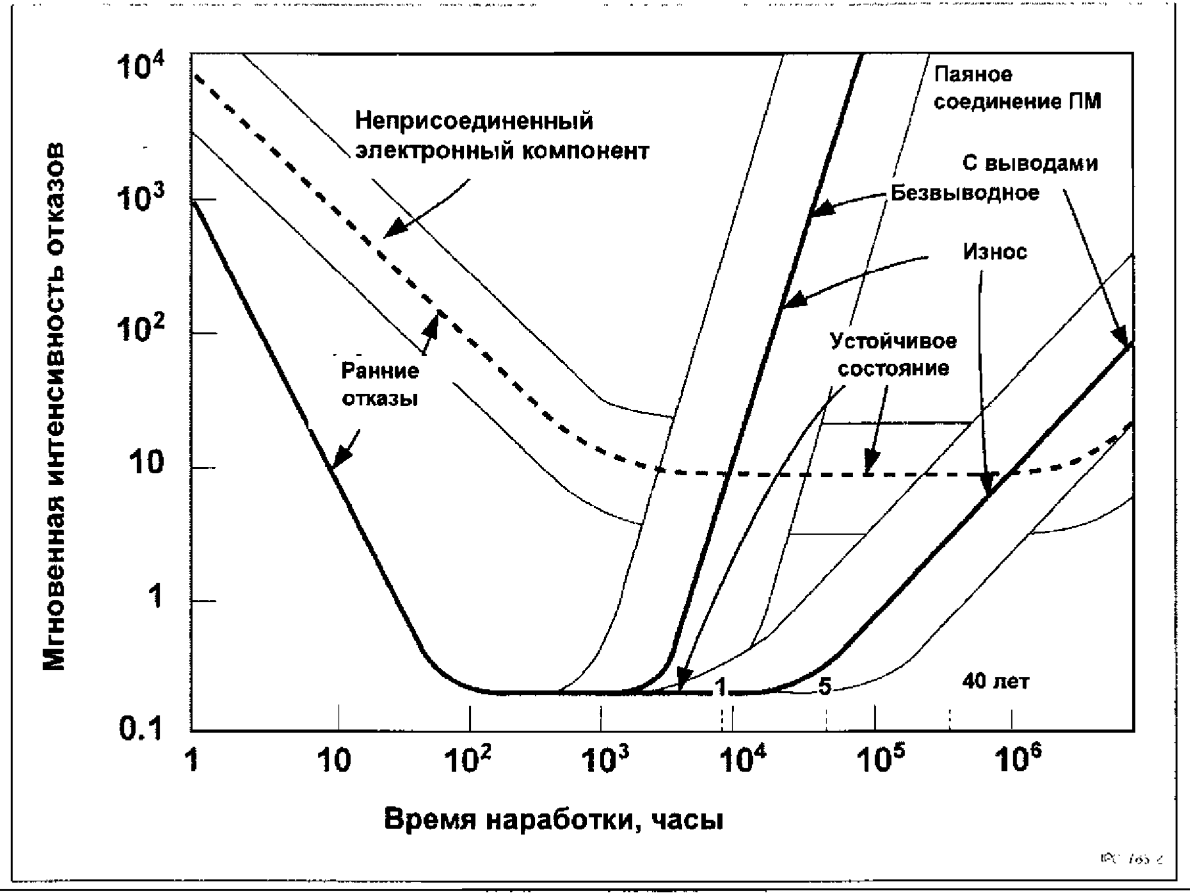


Рисунок 2 Сравнение "U-образных" характеристик надежности электронных компонентов и паяных соединений поверхностного монтажа

Кривые интенсивности отказов на Рисунке 2, а также результирующие графики совокупной вероятности отказа, показанные на рисунке 3, нуждаются в некоторых пояснениях. Области "раннего отказа", "случайного стационарного состояния" и "износа" определяются по тому, какой из этих трех режимов преобладает. Точки пересечения кривой на Рисунке 2 очерчивают протяженность этих областей.

За исключением областей износа для паяных соединений ПМ, отображенные на графике значения являются достаточно "расплывчатыми". Отсутствует достаточное количество точных данных об областях "раннего отказа" и "случайного стационарного состояния" как для компонента, так и для паяного соединения. Эти области графика определены на основании опыта и наблюдаемых трендов, а также некоторой опубликованной информации. Область "стационарного состояния" для компонентов в значительной степени зависит от сложности компонента; чип-компоненты выходят из строя значительно ниже указанной полосы интенсивности отказов, а очень сложные микросхемы с большим количеством выводов выходят из строя с более высокой интенсивностью.

Для паяных соединений ПМ вообще не наблюдается каких-либо признаков существования области "случайного стационарного состояния"; вполне вероятно, что динамика интенсивности отказов полностью определяется областями "ранних отказов" и "износа".

Следует отметить, что для паяных соединений ПМ области "ранних отказов" и "случайного стационарного состояния" являются несущественными, поскольку вероятности отказа слишком малы даже при допущении на порядок большей величины ошибок. Тем не менее, на основании экспериментальных наблюдений важно отметить, что приведенная в стандарте MIL-HDBK-217 оценка величины интенсивности отказов для области "случайного стационарного состояния" завышена на два или три порядка. Из рисунков 2 и 3 следует, что надежность электронных компонентов определяется областью отказов "случайное стационарное состояние". В противоположность этому, надежность паяных соединений ПМ определяется областью отказов "износ".

Совокупная вероятность отказа компонента и его паяного соединения ПМ равна сумме вероятностей отказа компонента и соединения. Таким образом, выход из строя электронной сборки наиболее вероятен из-за отказа компонентов в ближайшей перспективе, а вследствие отказа паяного соединения - в долгосрочной.

3.3 Обеспечение надежности

Надежность паяных соединений поверхностного монтажа требует исключительного внимания, как на стадии проектирования, так и в ходе производства. Обзор процессов обеспечения надежности приведен на блок-схеме, Рисунок 4.

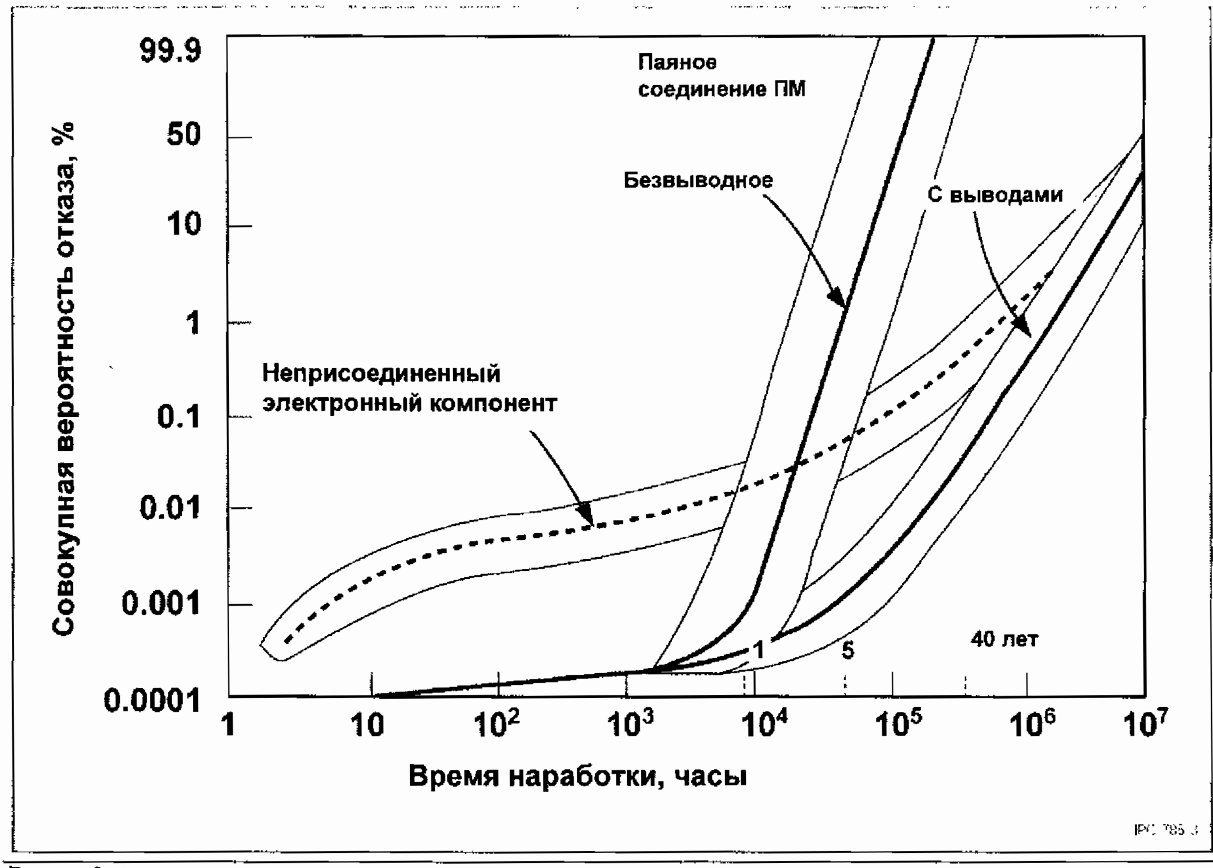


Рисунок 3 Характерная совокупная вероятность отказа для электронных компонентов и паяных соединений поверхностного монтажа

3.3.1 Общее представление о технологии паяных соединений

Припой является уникальным материалом по характеру зависимости его свойств от температуры, времени и деформирующих напряжений. Например, при температурах выше 20°С в эвтектическом оловянно-свинцовом припое легко возникает ползучесть и релаксация напряжений, в то время как при температурах ниже -20°С припой обладает долговременной способностью воспринимать нагрузку подобно другим металлам. Чем больше температура превышает значение 20°С и/или чем выше уровень напряжений, тем скорее появляются ползучесть и релаксация напряжений в припое.

Общее представление о надежности и механизмах разрушения применительно к технологии поверхностного монтажа является первым шагом к обеспечению надежности изделия на стадии проектирования. С этой целью необходимо создать общую базу данных. Несмотря на возможность развития механизмов разрушения, связанных с циклической или монотонной перегрузкой, наиболее распространенным угрожающим фактором для надежности является усталостное повреждение, обусловленное релаксацией напряжений. База данных усталостного разрушения должна основываться на сочетании малоускоренных и высокоускоренных испытаниях.

В этом случае испытания с малым ускорением дают средние значения времени наработки на отказ, в 10 - 20 раз меньшие срока службы в реальных условиях эксплуатации. Высокоускоренные испытания - в 100 - 500 раз меньшие. Чем выше ускорение испытаний, тем в меньшей степени результаты испытаний являются репрезентативными для характеристик в реальных условиях эксплуатации. Таким образом, испытания с малым ускорением более точно воспроизводят ожидаемые условия эксплуатации, в то время как высокоускоренные испытания - это "прикидочный" компромисс, вынужденный реальными затратами времени и ресурсов, необходимыми для испытаний с малым ускорением.

Для ускоренных испытаний является обязательным, чтобы разрушение наступало в результате ускорения соответствующих механизмов повреждения. Испытания на тепловой удар не вызывают ускорения долговременных механизмов отказа, представляющих интерес для большинства областей применения поверхностного монтажа, и могут привести к ошибочным выводам. Приоритетный движущий механизм, являющийся основной причиной длительного усталостного повреждения, обусловлен развитием ползучести и релаксации напряжений в припое. Поэтому в ускоренных испытаниях на усталость циклические предельные состояния должны перемежаться четко выраженными выдержками времени, чтобы учесть, пусть и не в полном объеме, состояние ползучести и релаксации напряжений. В циклах ускоренных испытаний имеет место незавершенность циклической ползучести и релаксации напряжений - в противоположность большинству случаев реальных условий эксплуатации, в которых обычно достаточно времени для полного завершения процессов ползучести и релаксации напряжений. Таким образом, значительно меньшее усталостное повреждение, полученное в циклах ускоренного испытания, должно быть пересчитано с помощью преобразования ускорения усталости.

Испытания с малым ускорением, показанные на Рисунке 4 в крайнем левом столбце, требуют высокоточной имитации условий эксплуатации при коэффициентах ускорения от десяти до двадцати. Например, если расчетная долговечность составляет двенадцать лет, испытания на усталость

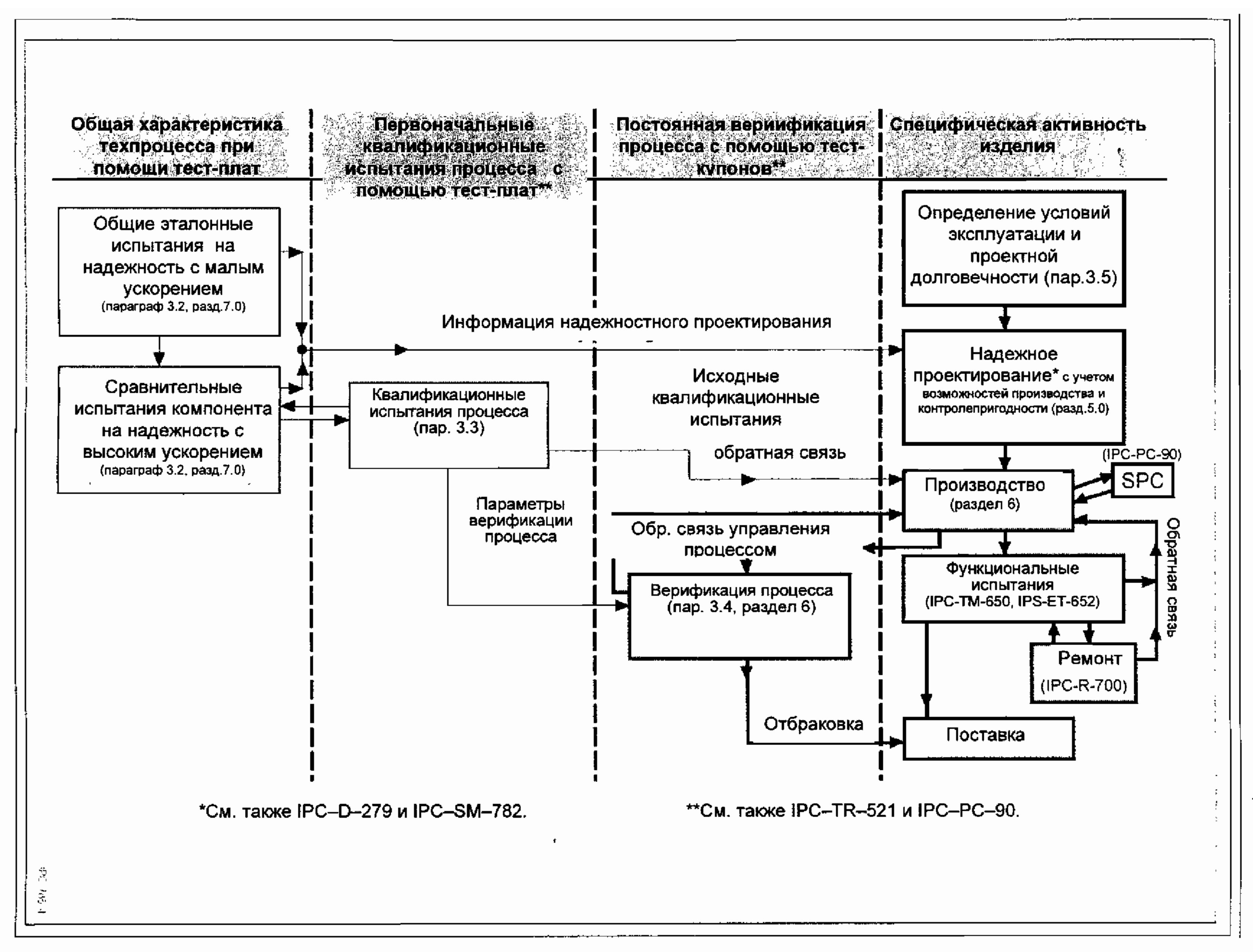


Рисунок 4 Блок-схема обеспечения надежности паяных соединений поверхностного монтажа

могут быть ускорены до точки завершения приблизительно через один год. Испытания с малым ускорением необходимы для получения основных, точных, "эталонных" результатов.

Высокоускоренные испытания обычно требуют применения циклических механических нагрузок в изотермических условиях. В этих испытаниях обеспечиваются значения коэффициентов ускорения до 500 для среднего времени наработки на отказ (MTTF) по сравнению реальными условиями эксплуатации. Это достигается проведением испытаний при повышенных температурах (выше 20°С) с приложением циклической механической нагрузки. Применение механического циклического воздействия в качестве нагрузочной методики обусловлено тем, что термоциклирование требует значительных времен перехода между предельными значениями высокой и низкой температуры во избежание повреждений, вызванных тепловым ударом, которые не являются характерными для механизма усталостного разрушения из-за релаксации напряжений. Проводимые с высоким ускорением испытания имеют сравнительно малое сходство с условиями эксплуатации и их результаты используются преимущественно для относительных оценок. Однако, при выполнении испытаний с малым и высоким ускорением для сопоставимых тест-плат испытания с малым ускорением могут выступать в качестве эталонов надежности для испытаний с повышенным ускорением. Таким образом, сочетание ограниченного количества продолжительных испытаний с малым ускорением со значительно более быстрыми испытаниями с высоким ускорением может обеспечить полноту базы данных.

Несмотря на то, что существует множество причин отказов микроэлектронных устройств, основной причиной отказа паяных соединений компонентов поверхностного монтажа является малоцикловая термическая усталость. Многоцикловая усталость, обусловленная вибрацией, тоже может внести свой вклад в усталостное повреждение. Таким образом, отказы паяных соединений технологии поверхностного монтажа (ТПМ) вызваны преимущественно термомеханическими напряжениями.

Частота термоциклов для малоцикловой термической усталости обычно колеблется от нескольких циклов в час до одного цикла в день или менее. Частотный диапазон вибрации оборудования обычно простирается от 10 Гц до 2000 Гц, что составляет более ста тысяч циклов в день. Усталостное разрушение при вибрации обусловлено преимущественно многоцикловой усталостью.

3.3.2 Проектирование

Общее представление, полученное в ходе ускоренных испытаний, должно быть преобразовано в проектно-конструкторскую информацию, которую можно было бы использовать при "надежностном проектировании". Проектно-конструкторская информация должна быть оформлена в виде простых инженерных средств, позволяющих неопытному разработчику оценивать соответствие конструкции требованиям надежности. Перед тем, как приступить к "надежностному проектированию" (крайний столбец справа на Рисунке 4), необходимо определить условия эксплуатации, предполагаемую расчетную долговечность и приемлемую совокупную вероятность отказа в конце расчетного срока службы.

3.3.3 Квалификационные испытания технологического процесса

Способность последовательности технологических операций процесса производить надежное изделие должна быть установлена в ходе квалификационной проверки процесса изготовления технологических тест-плат.

Некоторые из тест-плат проходят высокоускоренные испытания на надежность, а другие проходят процесс верификации. Квалификационные испытания отличаются относительной сложностью, поскольку при изготовлении и сборке электронной аппаратуры применяются многочисленные и разнообразные технологические операции.

Необходимо установить параметры управления технологическим процессом и показатели воспроизводимости процесса для обеспечения связи между надежностью и соответствующим изделием. Поскольку каждый производитель использует собственные сочетания процессов, управление процессом и квалификационные испытания для каждого из производителей различны. Для уверенности в том, что процесс основательно изучен, производитель должен выявить те стороны процесса, которые в наибольшей степени влияют на характеристики изделия. Правильное "планирование эксперимента", в котором оцениваются ключевые переменные величины с учетом их взаимодействия, имеет первостепенное значение при определении возможностей технологического процесса. Требования к планомерности путей определения воспроизводимости технологического процесса изложены в стандарте IPC-PC-90. В стандарте J-STD-001 приводится механизм оценки рабочих характеристик при помощи стратегического планирования.

На этапе "квалификационных испытаний процесса", показанном во втором столбце слева на Рисунке 4, задаются также интервалы параметров верификации процесса, которые обеспечивают соответствие изделия параметрам квалификационных испытаний процесса.

3.3.4 Верификация процесса

Многие факторы могут повлиять на производственный процесс таким образом, что это приведет к изменению характеристик изделия при его использовании по назначению. В тщательно изученном процессе определяются ключевые переменные и задаются соответствующие верхний и нижний пределы контроля этих атрибутов, которые оказывают значительное влияние на характеристики качества и надежности изделия. Если технологический режим изменяется, необходимо выполнить весовую оценку для определения значимости этого изменения, а также выяснить, является ли это изменение ожидаемым отклонением, фактором шума или неконтролируемым состоянием (выходом за допуски).

В качестве доказательства того, что процесс обладает запланированными возможностями, необходимо постоянно выполнять верификацию процесса с использованием серийных плат, технологических тест-плат или тест-купонов, отражающих конструкторские решения с одновременным применением статистического управления и обратной связи с внесением поправок/восстановлением.

Мониторинг характеристик изделия с использованием разрушающих и неразрушающих методов контроля обеспечивает верификацию взаимосвязи технического решения, расчетной надежности конструкции и производственных процессов.

Хотя к настоящему времени не установлена общая или стандартная методика верификации процесса, которая отвечала бы поставленным целям в достаточной степени, верификация соответствия процессов заданным требованиям является предметом продолжающихся интенсивных исследований. Частота проведения испытаний и виды привлекаемых методик должны соответствовать уровню проектирования и стабильности технологического процесса.

3.4 Механизмы разрушения/отказа

3.4.1 Механизмы разрушения при термоциклировании Преобладающим механизмом разрушения при термоциклировании является усталость из-за ползучести, усиленная релаксацией напряжений. На рисунке 5 показано стилизованное изображение энергии вязко-пластической деформации, пропорционально представленной площадью циклических петель гистерезиса на графике в координатах напряжение - деформация в одном цикле нагружения. Эта энергия вязко-пластической деформации вызывает усталостное разрушение, которое накапливается от цикла к циклу. С приложением нагрузки, начиная от нулевых значений напряжений, при незначительных деформациях паяное соединение сначала претерпевает упругую деформацию, сопровождаемую пластическим течением, если нагрузка распространяется за предел текучести припоя. Следует отметить, однако, что для припоя не существует ни истинно упругой деформации, ни предела текучести, определяемых в реальном физическом смысле. Линии упругая деформация-текучесть являются упрощенной линеаризацией нелинейной зависимости напряжение-деформация, которая сильно зависит от температуры, скорости нагружения, состава припоя и его кристаллической структуры. Кроме того, предел текучести - это искусственный параметр, определяемый в инженерных целях; его определение для припоя в равной степени сильно зависит от нескольких переменных, некоторые из которых контролируются (например, температура), а другие - нет (например, кристаллическая структура).

За участком упруго-пластического течения на нагрузочной кривой следует обусловленная релаксацией напряжений/ползучестью реакция паяного соединения, зависящая от температуры и уровня напряжений. За достаточный период времени, который может длиться от минут при высоких температурах до дней при пониженных температурах, напряжения в системе межсоединений, частью которых являются паяные соединения, в основном полностью релаксируют, вызывая в паяных соединениях максимально возможную остаточную пластическую деформацию. Выдержка сверх этого времени не вызовет дополнительного усталостного разрушения; однако, при повышенных температурах в припое продолжается разрушительный рост зерен.

Основным осложнением в механизме разрушения является тот факт, что во многих случаях и, по определению, во время всех ускоренных испытаний, периоды выдержки недостаточно продолжительны для полной релаксации напряжений. Этот эффект проиллюстрирован на рисунке 5 петлями гистерезиса с отметкой "ускоренные испытания", для которых площадь петли значительно меньше соответствующих площадей для условий, допускающих полную релаксацию напряжений. Это указывает на значительно меньшее усталостное разрушение за один цикл такого ускоренного циклического режима. Как следствие, количество циклов при ускоренном испытании не может быть прямо сопоставлено количеству эксплуатационных циклов.

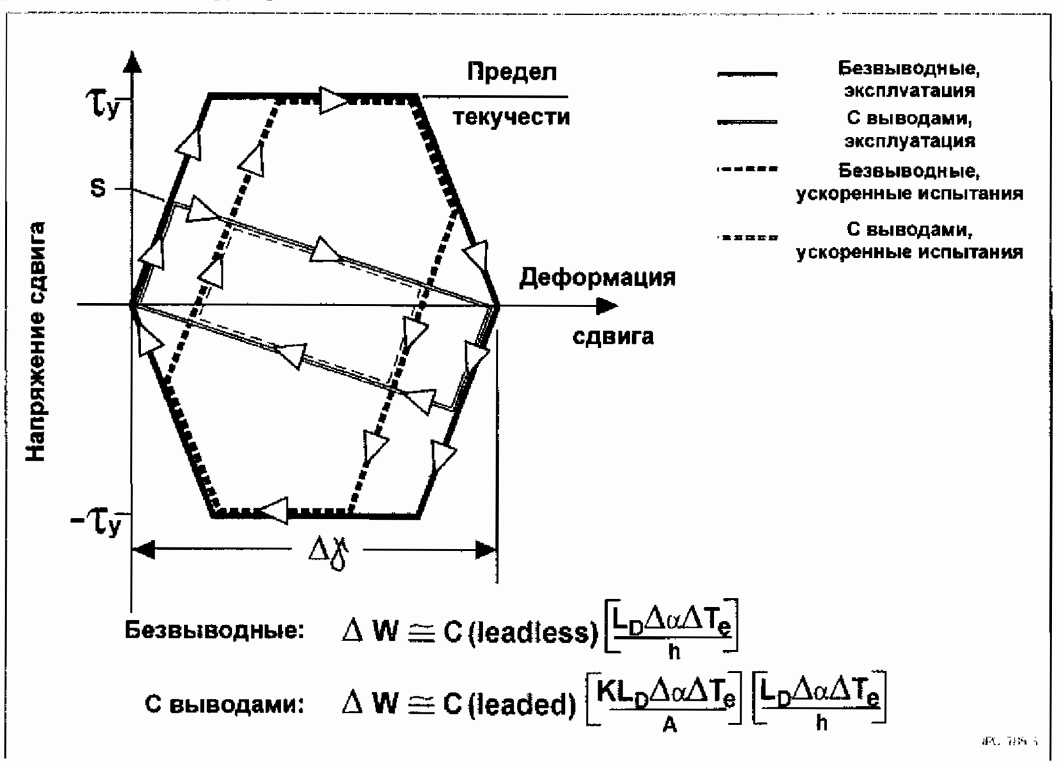


Рисунок 5 Накопленное усталостное повреждение

На рисунке 5 показано также существенное различие между паяными соединениями жестких безвыводных компонентов и соединениями компонентов ПМ с гибкими выводами. Соединения с гибкими выводами работают, потому что благодаря гибкости выводов максимум напряжений в паяных соединениях удерживается на уровне значительно ниже "предела текучести". Следует отметить, что в этом смысле не все выводы являются гибкими. Диагональная жесткость вывода на изгиб должна быть ниже 100 фунтов/дюйм; выше этого значения соединение ПМ с выводами становится неопределенным гибридом безвыводных соединений и соединений с гибкими выводами. Несмотря на то, что влияние гибкости выводов усложняет анализ, они существенно понижают накопление циклических усталостных повреждений даже для идентичных остаточных деформаций при полной релаксации напряжений. При заданной зависимости уровня напряжений от скорости релаксации напряжений и при пониженных уровнях напряжений для паяных соединений с гибкими выводами полная релаксация напряжений в паяных соединениях с гибкими выводами наступает значительно позже.

Следует отметить, что показанная на рисунке 5 симметричность петель гистерезиса возможна лишь в случае, когда периоды выдержки при низкой температуре значительно превышают по длительности периоды выдержки при высокой температуре; однако, симметрия является характерным явлением для изотермических циклических испытаний с механическим приложением нагрузок.

Описанное на рисунке 5 поведение паяных соединений характерно для циклических воздействий температуры при значениях выше -20°С. Область температур от -20 до +20°С является границей, характеризующей поведение припоя под нагрузкой, которое при повышенных температурах определяется преимущественно ползучестью/релаксацией напряжений, а при пониженных температурах преимущественно прилагаемым усилием. Механизм разрушения, описываемый уравнениями 3 и 4, относится к термоциклированию при температурах выше -20°С, которые является наиболее типичными для условий эксплуатации.

В областях применения, для которых релаксация напряжений и ползучесть в паяных соединениях не является преобладающим механизмом, например, в низкотемпературных устройствах с рабочей температурой компонентов менее 0°С и/или высокотемпературных /подвергающихся механическим колебаниям устройствах с частотой выше 0,5 Гц или длительностью полупериода выдержки менее 1 секунды, рекомендуется прямое применение уравнения Коффина-Мэнсона для усталостного разрушения (см. раздел 4.3.5).

Механизм разрушения паяных соединений, подвергаемых колебаниям температуры с большой амплитудой в диапазоне температур от -20 до +20°С, в котором происходит изменение реологических свойств припоя, не соответствует описанному в уравнениях 3 и 4 [1]. Механизм разрушения отличается от механизма, характерного для типичных условий эксплуатации, и вероятнее всего, определяется перенапряжением и рекристаллизацией.

По мере накопления усталостных повреждений размер зерен в паяных соединениях увеличивается. После того, как от 25% до 50 % срока службы паяных соединений до разрушения израсходовано, на пересечениях межзеренных границ формируются микропустоты или раковины. Эти микропустоты превращаются в микротрещины, которые по мере накопления усталостных повреждений растут и объединяются в макротрещины.

Для паяных соединений с неоднородным распределением напряжений и деформаций, в частности, с зубчатыми выступами, для разрушения достаточно единственной крупной трещины. Для паяных соединений с однородным распределением напряжений и деформаций, например, цилиндрических, образуется множество трещин, одна из которых в итоге приведет к разрушению паяного соединения.

3.4.2 Вибрационный механизм разрушения

Разрушение паяных соединений поверхностного монтажа, обусловленные воздействием вибрации, коренным образом отличаются от разрушений, вызванных сменой температур. При термоциклировании паяное соединение подвергается нагрузкам из-за несовпадения коэффициентов теплового расширения. Деформации паяного соединения определяются пластическим поведением, вызванным релаксацией напряжений за период выдержки в цикле. В противоположность этому, вибрации с относительной высокой частотой (выше 30 Гц), вызывают упругую реакцию в соединении. Создаваемые напряжения в общем случае имеют меньшую величину, и разрушение наступает через много циклов аналогично классическому механизму многоцикловой усталости в структурах.

Вибрации представляют собой периодическое движение корпуса относительно положения равновесия. Этот тип движения присутствует во многих областях применения, в частности, в автомобильной, аэрокосмической и военной аппаратуре. Следовательно, электронные блоки или устройства, используемые в этих условиях, тоже подвергаются вибрации. Вибрации передаются на печатный узел через шасси или каркас корпуса блока. Перемещение платы относительно крепежных кронштейнов приводит к ее изгибам. Напряжения, создаваемые в паяных соединениях поверхностного монтажа, являются, в первую очередь, функцией радиуса кривизны платы, возникшей в результате изгиба, и положения компонента на плате.

Обычно величина напряжений или амплитуда циклического напряжения, вызванного вибрацией, относительно мала. Это напряжение в сочетании с высокочастотным движением или с высокой скоростью деформации определяет упругую реакцию соединения. Быстро изменяющиеся нагрузки не дают развиваться релаксации напряжений. Кроме того, модуль упругости припоев имеет тенденцию к увеличению при возрастании частоты нагрузки или возрастании скорости деформаций. Это способствует упругому поведению.

Однако, в определенных условиях в паяных соединениях могут оставаться очень высокие напряжения. Если частота внешней возбуждающей силы приблизится к собственной частоте платы, возникнут значительные изгибы. Следовательно, в определенных местах платы будут создаваться большие напряжения. Частота свободных колебаний - это частота, с которой система вибрирует в свободном состоянии. При сближении внешней движущей частоты с этой частотой создаются условия для возникновения резонанса. Как правило, электронное оборудование испытывается в характерном для области применения диапазоне частот для уверенности в том, что в конструкции отсутствует нежелательные резонансные частоты.

Несмотря на то, что объемные напряжения являются упругими, разрушение происходит из-за локально сконцентрированных пластических явлений. Концентрация небольших напряжений или дефекты на поверхности припоя либо границах раздела создают локальные пластические деформации. В некоторых точках кристаллическая структура отдельных "зерен" ориентирована таким образом,

что максимальные приложенные напряжения сдвига превосходят критическое значение, необходимое для того, чтобы вызвать смещение в плоскостях скольжения. В условиях циклических нагрузок имеет место внедрение и вытеснение. В конечном итоге регулярные структуры внедрения или устойчивые полосы скольжения формируют микротрещины.

Микротрещины растут и объединяются в одну более крупную трещину. Распространение трещины обычно происходит транскристаллитно в отличие от "межкристаллитного" трещинообразования, наблюдаемое при термическом усталостном разрушении с преобладанием ползучести. Устойчивый рост трещины за счет образования полос скольжения продолжается до тех пор, пока соединение не сможет более выдерживать приложенную нагрузку. Последующее разрушение соединения происходит в состоянии, когда оно уже не является структурно и электрически устойчивым. Этот процесс обычно имеет место при большом количестве циклов (10^4 или более) и называется многоцикловой усталостью, в отличие от малоцикловой усталости (10^3 циклов или менее), возникающей при циклической деформации с достаточно большой амплитудой, чтобы вызвать пластическое течение; промежуточный диапазон является смешанной формой усталости.

3.4.3 Механизм разрушения при тепловом ударе

При тепловом ударе чрезвычайно высокая скорость изменения температуры (около 30°С/мин и выше) приводит к изгибу печатного узла с поверхностным монтажом. Причиной изгиба являются высокие динамические тепловые градиенты, возникающие из-за быстрого изменения температуры при помещении плат в новую тепловую среду. Изгибы вызывают возникновение напряжений растяжения и сдвига, причем растягивающая нагрузка превышает нагрузку из-за несоответствия коэффициентов теплового расширения в устойчивом состоянии. Таким образом, отказы паяных соединений при воздействии теплового удара появятся даже в сборках, имеющих согласованные коэффициенты теплового расширения. Механизм нагрузки при тепловом ударе поясняется на рисунке 6.

Возникновение теплового удара может быть обусловлено рядом причин. В качестве примера можно привести следующие причины:

1. Быстрое изменение внешних условий, например, переход с солнечной стороны на теневую в космосе.

2. Внезапные и значительные изменения состояния питания.

3. Разнообразные производственные/ремонтные операции, например, оплавление, испарение, доработка, ремонт и т. д.

При планировании экспериментов по оценке надежности не всегда обращают внимание на отличительные особенности теплового удара и термоциклирования. А между тем, тепловой удар и термоциклирование отличаются коренным образом. Основные отличия обусловлены механизмом нагрузки. Тепловой удар имеет тенденцию к созданию многоосных напряженных состояний с преобладанием растягивающих перенапряжений и усталости при растяжении. С другой стороны, как было показано ранее, термоциклирование приводит к появлению сдвиговых нагрузок, и разрушение наступает вследствие взаимодействия усталости при сдвиге и релаксации напряжений. Тепловой удар осуществляется в двухкамерном испытательном оборудовании, в то время как термоциклирование выполняется в однокамерном оборудовании для циклических испытаний. Двухкамерные устройства могут обеспечить скорости изменения температуры, превосходящие 50°С/мин.

Большинство однокамерных устройств обычно не могут обеспечить скоростей перехода, даже приближающихся к 30°С/мин, что ориентировочно является минимальной скорости, необходимой для возникновения теплового удара. Результаты этих двух типов испытаний, как правило, не коррелируют между собой, даже в случае принятия каких-либо конструктивных мер для продления долговечности в обоих режимах. Следовательно, выполнение испытаний на тепловой удар с целью оценки надежности паяных соединений поверхностного монтажа необходимо лишь в случае, если тепловой удар является одним из действительных условий эксплуатации, воздействию которых подвергается изделие.

В некоторых нормативных документах не устанавливается полное различие определений термоциклирования и теплового удара; скорости изменения температуры позволяют более точно определить состояние, которое считается тепловым ударом.

3.4.4 Разрушение паяных соединений при ползучести

Разрушение при ползучести относится к состоянию, в котором к паяному соединению прикладывается постоянная нагрузка. Приложение нагрузки создает в паяном соединении начальную деформацию. С течением времени в припое соединения возникает ползучесть. Это приводит к увеличению деформации, хотя нагрузка на образец остается постоянной. Разрушение при ползучести наступает в момент, когда припой больше не может выдерживать приложенную нагрузку и разрывается с образованием трещины.

Для разрыва припоя при ползучести время до наступления разрушения можно отобразить графически в зависимости от приложенных исходных нагрузок или величины деформации. Последнее состояние встречается в случае, когда компоненты припаяны к плате, и плата принимает изогнутую форму, создавая постоянное напряжение в каждом из паяных соединений. Если плата сохраняет изогнутое состояние, паяные соединения могут претерпеть разрыв из-за разрушения при ползучести. Анализ поверхности излома наиболее вероятно покажет обычный вязкий характер разрушения.

Пока разрушение при ползучести подобно релаксации напряжений в терминах лежащего в его основе механизма, релаксация напряжений является состоянием, возникающим в паяном соединении под воздействием постоянной деформации. С течением времени напряжения в паяном соединении релаксируют, но деформация остается постоянной. Понижение нагрузки при постоянной деформации приводит к тому, что упругие деформации в паяном соединении преобразуются в остаточные пластические деформации.

3.5 Учет области применения

Надежность сборки с поверхностным монтажом зависит от условий эксплуатации, ожидаемой циклической долговечности и допустимой совокупной вероятности отказа в конце циклического срока службы. Надежность соединений поверхностного монтажа зависит также, конечно, от параметров конструкции сборки (включая количество и сочетание компонентов), которые будут рассмотрены в разделе "Надежностное проектирование".

3.5.1 Условия эксплуатации

В таблице 1 приведены наихудшие, но реалистичные условия эксплуатации электронных сборок ПМ для девяти основных категорий применения. Эти категории условий эксплуатации приведены в порядке возрастания жесткости условий без учета количества лет ожидаемого срока эксплуатации. Следует отметить, что циклический диапазон температур ΔT не является перепадом между возможными крайними значениями температуры при эксплуатации,

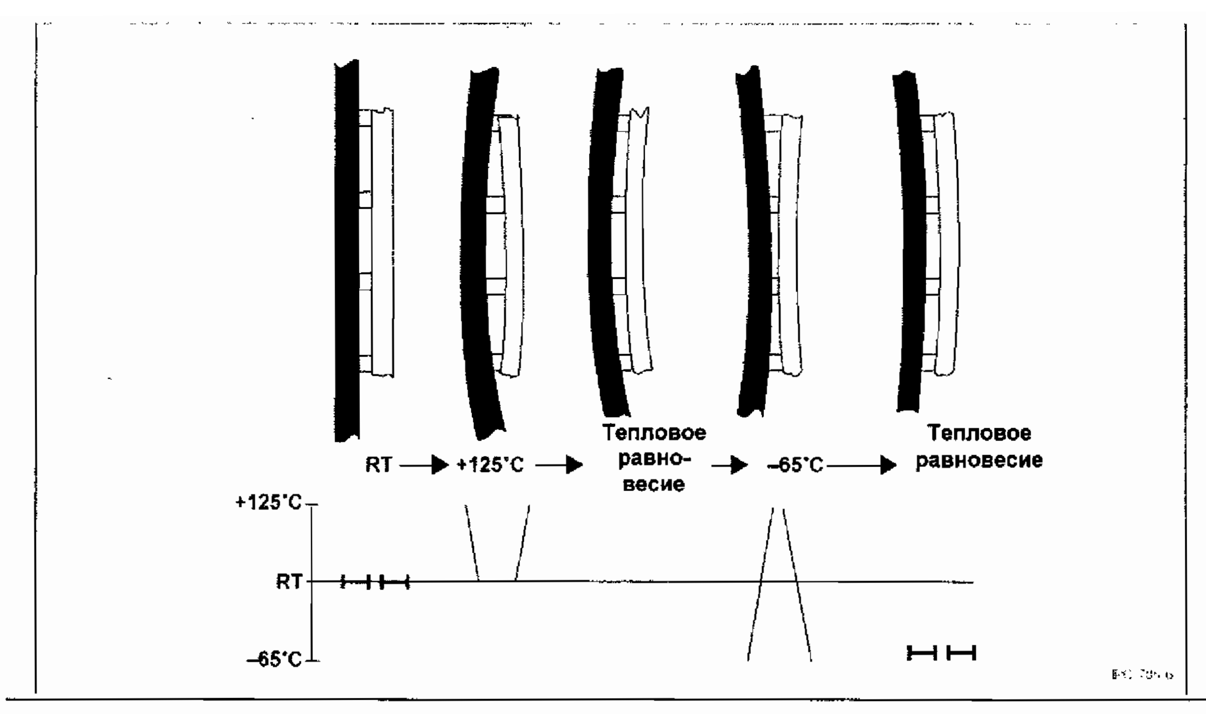


Рисунок 6 Термомеханический изгиб сборок ПМ, вызванный градиентами температуры при тепловом ударе

минимальным, T_{MIN} и максимальным, T_{MAX}; обычно ΔT значительно меньше. Необходимо учитывать, что эти экстремальные значения температуры возможны только в различное время года для значительно удаленных географических пунктов. Значения ΔT характеризуют наихудший случай циклических колебаний температуры, ожидаемый в течение данного рабочего цикла.

Кроме этого, приведена ожидаемая длительность периодов выдержки t_D при рабочих температурах; они имеют большое значение, поскольку определяют степень завершенности релаксации напряжений в паяных соединениях, определяя тем самым объем циклических усталостных повреждений при полной релаксации напряжений. Таблица 1 дает также оценочные значения количества рабочих циклов, происходящих в течение года эксплуатации. Между количеством рабочих циклов в год и циклическими периодами выдержки существует обратная зависимость. Для некоторых категорий применения условия эксплуатации описаны в виде суммы нескольких условий по причине либо существенной сезонной зависимости, либо широко предсказуемых условий эксплуатации; категория военной авионики подразделяется на три подкатегории, отражающие различные условия эксплуатации в зависимости от типа воздушного судна, расположения в самолете, программы полета, влияния географического положения и т. д. Космическая категория содержит два типа условий для спутников, находящихся на околоземной орбите (LEO) или на геосихронной орбите, стационарной относительно Земли (GEO).

Изменение температуры внешней окружающей среды (снаружи корпуса оборудования) является одним из множества факторов, определяющих реальный температурный цикл, в котором оказывается конкретное устройство поверхностного монтажа в реальной аппаратуре. Только для очень простого оборудования с постоянным потреблением питающей мощности колебания температуры будут соответствовать условиям окружающей среды. В некоторых случаях, допуская, что температура окружающей среды является причиной колебаний температуры внутри отсека, разработчик системы предусматривает встроенные средства понижения циклических колебаний температуры в отсеке, которые включают вентиляторы, если температура поступающего воздуха превышает определенные пределы, или активируют нагреватели поступающего воздуха, если температура воздуха на входе падает ниже заданных пределов. В некоторых случаях изменение температуры внутри корпуса электронной аппаратуры определяется изменениями мощности, рассеиваемой электронными приборами. Примером такого режима работы является телекоммуникационное оборудование, в котором полная мощность рассеяния зависит от потока обмена информацией или количества вызовов, проходящих через систему одновременно. Внутри системы могут создаваться сравнительно большие колебания температуры между периодами с высоким трафиком, преимущественно в рабочее время, и периодами с низким трафиком, обычно в вечернее или ночное время, даже если система смонтирована в помещении с воздушным кондиционированием и практически не подвержена изменениям температуры окружающей среды. Прибор, смонтированный поблизости от радиатора высокой мощности, подвержен воздействию изменений температуры теплового следа, создаваемого радиатором, даже если температура внутри корпуса поддерживается постоянной. Эти примеры показывают, что в большинстве случаев изменение температуры окружающей оборудование среды не является

Таблица 1 Наихудшие условия эксплуатации электронной аппаратуры широкого применения и рекомендуемые ускоренные испытания для паяных соединений поверхностного монтажа
(реальные тепловые режимы эксплуатации должны быть установлены термическим анализом или измерениями)

КАТЕГОРИЯ ПРИМЕНЕНИЯ	НАИХУДШИЕ УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ					Типичн. срок службы, лет	Прибл. допуст. риск отказа, %	УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ			
	Tmin °C	Tmax °C	ΔT[1] °C	t_D час	Циклов/ в год			Tmin °C	Tmax °C	ΔT[2] °C	t_D мин
1) ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ ТОВАРЫ	0	+60	35	12	365	1-3	1	+25	+100	75	15
2) КОМПЬЮТЕРЫ	+15	+60	20	2	1460	5	0.1	+25	+100	75	15
3) ТЕХНИКА СВЯЗИ	-40	+85	35	12	365	7-20	0.01	0	+100	100	15
4) ГРАЖДАНСКАЯ АВИАЦИЯ	-55	+95	20	12	365	20	0.001	0	+100	100	15
5) ПРОМЫШЛЕННЫЙ И АВТОМОБИЛЬНЫЙ ПАССАЖИРСКИЙ ТРАНСПОРТ	-55	+95	20 &40 &60 &80	12 12 12 12	185 100 60 20	10	0.1	0	+100	100 & ХОЛОД[3]	15
6) ВОЕННАЯ АППАРАТУРА НАЗЕМНОГО И МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ	-55	+95	40 &60	12 12	100 265	10	0.1	0	+100	100 & ХОЛОД[3]	15
7) КОСМОС leo geo	-55	+95	от 3 до 100	1 12	8760 365	5-30	0.001	0	+100	100 & ХОЛОД[3]	15
8) ВОЕННАЯ АВИОНИКА a b c	-55	+95	40 60 80 &20	2 2 2 1	365 365 365 365	10	0.01	0	+100	100 & ХОЛОД[3]	15
9) АППАРАТУРА ПОД КАПОТОМ АВТОМОБИЛЯ	-55	+125	60 &100 &140	1 1 2	1000 300 40	5	0.1	0	+100 & ХОЛОД[3]	100 & БОЛЬШОЙΔT[4]	15

& = в дополнение

1) ΔT характеризует максимум амплитуды циклических колебаний температуры, но не включает влияние мощности рассеяния; необходимо рассчитать ΔT для мощности рассеяния; мощность рассеяния может существенно понизить точность "чистых" ускоренных испытаний на устойчивость к термоциклированию. Следует отметить, что циклический диапазон температур, ΔT не является перепадом между возможным минимальным, T_{MIN} и максимальным, T_{MAX}, крайними значениями температуры; обычно ΔT значительно меньше.

2) Все циклы ускоренных испытаний должны иметь скорость изменения температуры <20°С/мин и периоды выдержки при максимальных значениях температуры, измеряемой на тест-платах, должны быть равны 15 минутам. При этом получится ~ 24 циклов испытаний/день.

3) Механизм отказа/разрушения припоя при пониженных температурах изменяется; для сборок, работающих в условиях сильного охлаждения, рекомендуется выполнять дополнительное "ХОЛОДНОЕ" термоциклирование, приблизительно от -40 до 0°С, с достаточно длительными периодами выдержки для выравнивания температуры и количеством циклов, равным количеству рабочих циклов при низкой температуре в реальных условиях эксплуатации.

4) Механизм отказа/разрушения в припое изменяется при большом размахе циклического изменения температуры, пересекающем переходную область зависимости деформации от напряжения в диапазоне от -20 до +20°С; для сборок, подвергающихся таким циклам при эксплуатации, рекомендуется проводить дополнительное испытание "БОЛЬШОЙ ΔT" с использованием амплитуды и количества циклов, соответствующих реальным условиям применения.

хорошим индикатором реального цикла изменения температуры на уровне устройства. Различные устройства внутри одной и той же системы, вероятнее всего, подвергаются воздействию различных температурных циклов. Поэтому для выяснения действительных амплитуд циклических колебаний температуры различных компонентов необходимо выполнять термический анализ или измерения температур. Лучше всего это осуществлять в условиях, когда питание соответствующего компонента отключено, а остальная часть системы работает нормально. Если учитываются колебания мощности, то циклическое изменение температуры, относящееся к энергетическому циклу, необходимо прибавить к изменениям температуры местного окружения. В большинстве случаев разность температур между корпусом прибора и платой, на которой он установлен, не превышает 5°С. В этих случаях простое наложение двух циклов (обусловленных местным окружением и рассеваемой мощностью) вполне пригодно для оценки воздействия реального температурного цикла на паяное соединение конкретного устройства в различном окружении и в различных условиях эксплуатации.

3.5.2 Срок службы

Расчетный срок службы N значительно изменяется для категорий применения, приведенных в таблице 1. Расчетный срок службы может изменяться в пределах от менее одного года, едва превышая гарантийный период потребительских товаров, до 20 лет и более для оборудования связи и гражданской авиации. Для некоторых военных областей применения срок службы измеряется в тысячах часов.

3.5.3 Допустимая совокупная вероятность отказа

Допустимая совокупная вероятность отказа, F(N), в конце расчетного срока службы, N, может существенно изменяться в зависимости от назначения изделия, его сложности (количества и состава компонентов), а также от расчетного срока службы. Значения F(N) могут меняться в диапазоне от 1 ppm для изделий, отказ которых имеет опасные последствия, например, кардиостимуляторы, до порядка 10000 ppm (1%) для потребительских товаров или изделий, которые обеспечивают резервирование или "ограниченную работоспособность" в случае отказа электрических систем.

4.0 УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Характеристика усталости паяных соединений поверхностного монтажа исследовалась экспериментально в многочисленных научных изысканиях. Результаты исследований, которые выполнялись таким образом, чтобы получить механизм разрушения, подобный действующему при эксплуатации типичных электронных изделий, позволили разработать математическую модель развития усталости в припое. По мере получения дополнительных результатов испытаний модель была расширена и дополнена до состояния, представленного в этом разделе.

Модель относится к паяным соединениям, не имеющим покрытия. Разработка обобщенной модели, учитывающей влияние всех факторов, невозможна из-за сложности и обширного разнообразия влагозащитных покрытий. Для оценки влияния покрытия на надежность необходимо провести сравнительные испытания тест-плат, имеющих данное покрытие, и плат без покрытия.

4.1 Общие модели усталостной долговечности Обобщенный закон усталостного разрушения для металлов был разработан, исходя из совокупной накопленной плотности энергии вязко-пластической деформации. Усталостная долговечность при циклической сдвиговой нагрузке N_f связана с плотностью энергии вязко-пластической деформации за один период стабилизированного цикла усталости ΔW уравнением, предложенным Морроу [6]:

$$\overline{N_f} = C\,[\,\Delta W\,]^{\,1/c}, \qquad (1)$$

где C –константа материала, а значение показателя c для большинства металлов лежит в пределах от -0,5 до -0,7. Отсюда может быть непосредственно получено известное соотношение Коффина-Мэнсона для усталостной долговечности при пластической деформации [5], являющееся ограниченным по напряжению частным случаем этой обобщенной функции усталостного разрушения, в виде:

$$\overline{N_f} = C\,[\Delta\gamma_p\,]^{\,1/c}, \qquad (2)$$

где $\Delta\gamma_p$ – диапазон пластических деформаций при циклическом воздействии.

4.2 Усталость паяного соединения

Долговременная надежность паяных соединений поверхностного монтажа (ПМ) определяется разностью между требуемым расчетным сроком службы и циклической усталостной долговечностью паяного соединения, которая зависит от конструкции компонентов, конструкции сборки и условий эксплуатации. Циклическая усталостная долговечность паяного соединения определяется величиной усталостных повреждений, накапливаемых при циклическом воздействии. Разрушение паяного соединения происходит тогда, когда суммарная величина накопленных повреждений превосходит способность припоя выдерживать такое повреждение.

Реакция паяного соединения на циклические сдвиговые напряжения характеризуется петлей гистерезиса на плоскости в координатах напряжение сдвига/остаточная деформация (см. рисунок 4). Площадь этой петли гистерезиса представляет собой плотность энергии вязко-пластической деформации за один цикл ΔW.

Для паяных соединений безвыводных компонентов ПМ петля гистерезиса ограничена огибающей кривой постоянного напряжения (не зависящей от несовпадения коэффициентов теплового расширения), определяемой пределом текучести припоя при первоначальной упругой нагрузке и пластическим течением, и линиями снижения прочности в ходе процесса ползучести и релаксации напряжений. Анализ паяных соединений для безвыводных компонентов ПМ выполняется относительно просто, поскольку в отличие от анализа реакции соединений компонентов с выводами, он не усложнен эффектами взаимодействия припоя с конструкцией гибких выводов.

Для типичных паяных соединений с выводными компонентами поверхностного монтажа максимальные значения напряжений в паяном соединении лежат значительно ниже предела текучести припоя и зависят от различий коэффициентов теплового расширения. Таким образом, линии снижения прочности, за исключением участка первоначальной упругой нагрузки, определяют ширину петли гистерезиса в направлении оси напряжений. Как для безвыводных, так и для выводных паяных соединений максимальные напряжения определяются деформациями, возникающими из-за несоответствия коэффициентов теплового расширения.

При использовании металлов в диапазоне температур, когда зависящие от времени и температуры процессы ползучести и релаксации напряжений становятся значительными по сравнению с первоначальной пластической деформацией, обусловленной текучестью (обычно выше 50% абсолютной температуры плавления), прямое определение ΔW или $\Delta\gamma_p$ становится невозможным. Суммарная пластическая деформация со временем возрастает по мере того, как накопленная в структуре "вывод компонента/паяное соединение/подложка" энергия упругой деформации преобразуется в энергию совокупной необратимой вязко-пластической деформации в элементе конструкции (припой), в котором развивается ползучесть/релаксация напряжений. По истечении достаточного времени, которое для припоя при рабочих температурах может быть непродолжительным, практически вся запасенная энергия упругой деформации накапливается в виде энергии вязко-пластической деформации в паяных соединениях. При этом циклический обход петли гистерезиса на плоскости напряжение сдвига/деформация достигает максимума, характеризуя тем самым максимальное циклическое усталостное разрушение в паяном соединении.

В ускоренных испытаниях на усталость длительность времени выдержки в течение полупериодов цикла недостаточна для полного завершения процессов релаксации напряжений/ползучести; эти укороченные времена выдержки

обеспечивают ускорение испытаний, но при этом должно быть учтено их влияние на снижение циклического усталостного разрушения в ходе испытаний.

4.3 Усталостная характеристика паяных соединений

Было показано [2,3,4] что усталостная долговечность паяных соединений поверхностного монтажа может быть описана степенной зависимостью, подобной уравнению Коффина-Мэнсона для малоцикловой усталости [5], выведенному для типичных технических металлов. В практических целях и как прямое следствие временных характеристик релаксации напряжений/ползучести в припое в типичных условиях применения (см. Таблицу 1), частный случай уравнения Коффина-Мэнсона требует возврата к более общему соотношению Морроу [6]; необходимо также рассчитывать энергию циклической деформации на основании суммарного вероятного несовпадения теплового расширения и представить показатель степени, как функцию температуры и времени, чтобы оценить степень завершенности процесса релаксации напряжений.

Прогнозирование усталостной долговечности $N_f(x\%)$ паяных соединений поверхностного монтажа, а следовательно, и надежности соединений ПМ, возможно как для изотермических механических, так и для тепловых циклических испытаний [7]. Эти прогнозы относятся к типичным реалистическим условиям эксплуатации и репрезентативным ускоренным испытаниям и вызывают возражения, приведенные ниже в данном разделе далее.

Для жестких безвыводных паяных соединений ПМ, у которых напряжения в паяных соединениях превосходят порог текучести припоя, прогностическое уравнение для теплового циклического нагружения имеет вид:

$$N_f(x\%) = \frac{1}{2}\left[\frac{2\varepsilon_f}{F}\frac{h}{L_D\Delta\alpha\Delta T_e}\right]^{-\frac{1}{c}}\left[\frac{\ln(1-0.01x)}{\ln(0.5)}\right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3)$$

Следует отметить, что в уравнении 3, а также в уравнении 4, параметры, стоящие слева от вторых скобок, отражают физические причины отказа и определяют среднюю циклическую долговечность; члены уравнения, находящиеся в вторых скобках, отражают статистическое распределение отказов, которое представлено в виде распределения Вейбулла.

Для паяных соединений с гибкими выводами, у которых напряжения в паяных соединениях лежат ниже предела текучести и, следовательно, не ограничиваются им, прогностическое уравнение имеет вид:

$$N_f(x\%) = \frac{1}{2}\left[\frac{2\varepsilon_f}{F}\frac{(200\ psi)\ Ah}{K_D\,(L_D\,\Delta\alpha\Delta T_e)^2}\right]^{-\frac{1}{c}}\left[\frac{\ln(1-0.01x)}{\ln(0.5)}\right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

где коэффициент масштабирования для метрических единиц измерения равен 1,38 МПа вместо 200 psi, где для оловянно-свинцовых припоев с составом, близким к эвтектическому (63/37 и 60/40, для припоев другого состава ожидаются другие значения коэффициентов)

$$c = -0.442 - 6X10^{-4}T_{SJ} + 1.74X10^{-2}\ln\left(1 + \frac{360}{t_D}\right) \quad (5)$$

и где

A = эффективная минимальная площадь паяного соединения, воспринимающая нагрузку (= 2/3 площади проекции смачиваемой припоем области вывода на контактную площадку),

c = показатель усталостной пластичности, определенный в уравнении 5,

F = эмпирический коэффициент "неидеальности", указывающий на отклонения реальных паяных соединений от идеализирующих допущений, учитывающий вторичное и, чаще всего, неопределенное влияние циклических искажений формы и переходных состояний, неидеальность геометрии паяного соединения, наличие хрупких интерметаллических соединений и обогащенных Pb межфазных слоев, различие коэффициентов теплового расширения припоя и присоединяемого материала, а также неточности и неопределенности параметров уравнений 3 и 4; 1,5>F>1,0 для цилиндрических безвыводных соединений, 1,2>F>0,7 для безвыводных соединений с галтелями (корончатые кристаллодержатели и чип-компоненты), F = 1 для паяных соединений с использованием гибких выводов;

h = высота паяного соединения, для соединений с выводами h = 1/2 толщины трафарета для паяльной пасты, что является характерным для усредненной толщины припоя,

K_D = "диагональная " изгибная жесткость свободного неспаянного вывода компонента, определяемая энергетическими методами расчета деформации [8,9,10,11] или методом конечных элементов,

$2L_D$ = максимальное расстояние между паяными соединениями компонента, измеренное между центрами контактных площадок,

N = (циклическая частота интервалов расчетной долговечности), количество рабочих циклов в течение срока службы изделия,

$N_f(x\%)$ = количество рабочих циклов при вероятности отказа x%,

T_C, T_S = установившаяся рабочая температура компонента и подложки ($T_C > T_S$ для диссипации энергии в компоненте) во время выдержки при высокой температуре,

$T_{C,0}, T_{S,0}$ = установившаяся рабочая температура для компонента и подложки во время выдержки при низкой температуре, для нерабочих полупериодов (питание отключено)

T_{SJ} = $(1/4)(T_C + T_S + T_{C,0} + T_{S,0})$, средняя температура паяного соединения в цикле,

t_D = время выдержки в полупериоде, выраженное в минутах - среднее время для релаксации напряжений при температурах T_C, T_S и $T_{C,0}$, $T_{S,0}$,

x = допустимая совокупная вероятность отказа для исследуемого компонента после N циклов, %,

α_C, α_S = коэффициент теплового расширения (КТР) для компонента и подложки,

β = параметр формы распределения Вейбулла, наклон графика распределения; если оно неизвестно, используйте 4 для безвыводных соединений и 2 для соединений с гибкими выводами,

ΔD = потенциальное повреждение при циклическом нагружении после полной релаксации напряжений,

ΔT_C = T_C - $T_{C,0}$, амплитуда циклических колебаний температуры компонента,

ΔT_e = $(\alpha_S \Delta T_S - \alpha_C \Delta T_C)/\Delta\alpha$, эквивалентная амплитуда циклических колебаний температуры, вызывающая диссипацию энергии в компоненте, а также колебания внешней температуры компонента ($\Delta\alpha \neq 0$),

ΔT_S = T_S - $T_{S,0}$, амплитуда циклических колебаний температуры подложки (в области компонента),

$\Delta\alpha$ = α_C - α_S, абсолютная разность коэффициентов теплового расширения компонента и подложки, несовпадение КТР,

ε_f' = коэффициент усталостной пластичности, $2\varepsilon_f'$ = 0,65 для оловянно-свинцовых припоев с составом, близким к эвтектическому (63/37 и 60/40), для припоев другого состава ожидаются другие значения коэффициента ε_f'.

В уравнениях 3 и 4 содержатся все параметры первого порядка, влияющие на усталость паяного соединения при сдвиге и полученные на основании фундаментальных представлений о восприимчивости паяных соединений поверхностного монтажа к циклическому накоплению усталостных повреждений, вызванных деформациями сдвига из-за несовпадения теплового расширения компонента и подложки. Эти сдвиговые деформации, обусловленные общим несоответствием теплового расширения, являются причиной независящей от времени остаточной пластической деформации, а также деформаций, обусловленных ползучестью/релаксацией напряжений, зависящих от времени, температуры и напряжения [7,12]. Эти деформации, возникающие в условиях циклического нагружения, формируют петлю гистерезиса энергии вязко-пластической деформации, которая характеризует реакцию паяного соединения на термоциклирование, а ее площадь определяет величину усталостных повреждений, накапливаемых при циклическом воздействии. Петли гистерезиса в координатах "напряжение сдвига - деформация" были получены опытным путем в [4,13,14,15]. В уравнениях 3 и 4 A, h, K_D и L_D являются физическим конструктивными параметрами; $\Delta\alpha$ зависит от свойств материала компонента и подложки; ΔT_e отражает внешние условия воздействия на компонент и тепловые режимы, а также внутреннюю диссипацию энергии в компоненте; c в уравнении 5 учитывает степень завершенности циклически возобновляемого процесса релаксации напряжений в паяных соединениях (коэффициенты в выражении для c зависят от состава припоя— значения приведены для припоя 60 Sn/40 Pb и эвтектического состава Sn/Pb), а b представляет собой наклон статистического распределения вероятности отказа Вейбулла.

Фактор "неидеальности" F должен определятся эмпирическим путем по различию прогнозируемой уравнениями 3 или 4 усталостной долговечности идеализированных паяных соединений (F=1), и усталостной долговечности, полученной эмпирически в ходе ускоренных испытаний. Следует отметить неочевидность того, что полученные при ускоренных испытаниях значения F обязательно подойдут для циклических условий эксплуатации, в которых обычно возможна более полная релаксация циклических напряжений.

4.3.1 Определение отказа

Паяные соединения, подвергаемые циклическому воздействию несоответствий теплового расширения, выходят из строя в результате накопления сдвиговых усталостных повреждений, т.е. из-за явления износа. В зависимости от условий нагружения эти усталостные повреждения могут усугубляться растягивающими напряжениями (из-за вибрации и/или механического удара), процессами ползучести и релаксации напряжений, коррозии и/или окисления, и другими способствующими разрушению механизмами.

Отказ паяного соединения определяется, как полное разрушение по сечению паяного соединения, в результате которого части соединения теряют сцепление друг с другом.

Отказ паяного соединения вследствие полного разрушения обычно не сопровождается обрывом электрической цепи или даже заметным возрастанием электрического сопротивления. Как правило, отказавшее паяное соединение окружено исправными, вследствие чего между поверхностями излома паяного соединения создается прижимной контакт. Отказ паяного соединения электрически обнаруживает себя только во время тепловых и механических переходных состояний либо возмущений в виде непродолжительных (~ 1 мкс) пиковых отклонений повышенного сопротивления (≥300 Ом). При изменениях температуры паяные соединения подвергаются сдвиговым нагрузкам, а не растягивающим; поэтому поверхности излома разрушенных паяных соединений проскальзывают относительно друг друга, создавая непродолжительные нерегулярности характеристик проводимости. Поэтому, в данном случае, практическим определением отказа является прерывание электрической цепи (> 300 Ом) на периоды, длительность которых превышает 1 мкс [16].

Однако интервал между отказом паяного соединения и моментом обнаружения этого отказа может составлять сотни циклов. Это особенно важно для ускоренных испытаний на надежность с ожиданием ранних отказов (<~ 1000 циклов), в которых интервал обнаружения может стать значительной частью суммарной долговечности.

4.3.2 Динамика многократных циклических нагрузок

Различный характер приложения многократных нагрузок, например,"холодные" термоциклы нагружения (хранение и транспортировка) в сочетании с термоциклированием при повышенных температурах, сопровождаемым ползучестью (в нормальных условиях эксплуатации, а также при отказе системы кондиционирования воздуха, см Таблицу 1) и вибрацией - все это дает свой вклад в накопленное усталостное повреждение паяных соединений. Допуская, что эти вклады в повреждение накапливаются линейно (на этом допущении основываются также уравнения 3 и 4), и что одновременность протекания либо порядок следования процессов приложения нагрузки не имеет существенного значения, можно применить правило Палгрена-Майнера [17]:

$$\sum_{i}^{i} \frac{N_i}{N_{f,i}} \leq 1 \qquad (6)$$

где

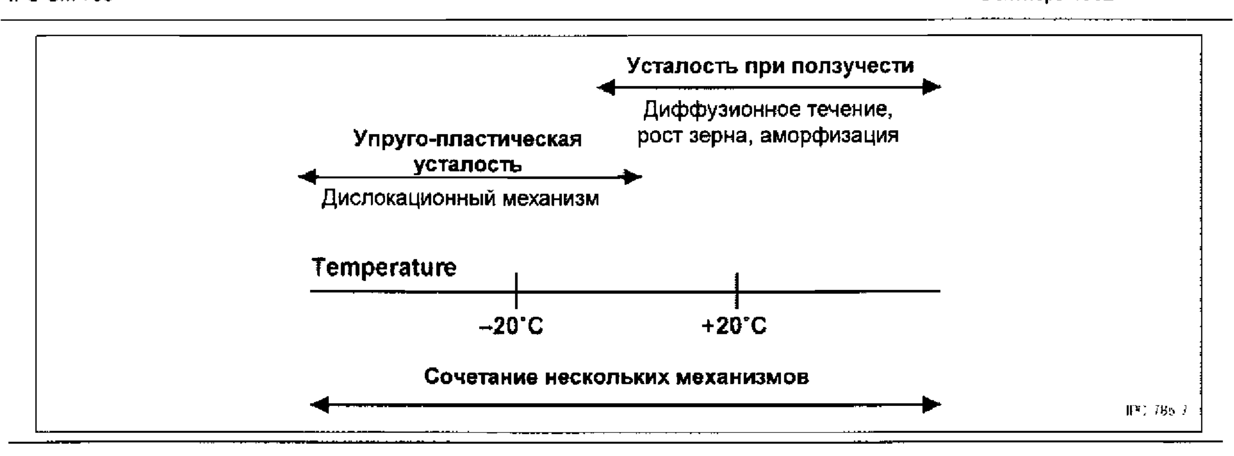


Рисунок 7 Механизмы термоциклической усталости припоя

N_i = фактическое количество циклов при уровне удельной циклической нагрузки i.

N_{fi} = усталостная долговечность при допустимой вероятности отказа для этого же уровня удельной циклической нагрузки i в отдельности.

Уравнение 6 можно использовать при допустимом значении суммы дробных количеств усталостного повреждения значительно меньшим единицы, чтобы обеспечить более высокий коэффициент запаса надежности. Однако, если количество циклов и значения усталостной долговечности в уравнении 6 уже относятся к низким значениям вероятности отказа, запас надежности обеспечивается более явно, и уравнение 4 должно использоваться в приведенном виде.

4.3.3 ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ 1— Качество паяного соединения Усталостная характеристика паяного соединения и соответствующие прогностические соотношения, уравнения 3 и 4, были определены по результатам термоциклирования паяных соединений, которые вышли из строя из-за разрушения припоя, причем характер разрушения иногда близок к наблюдаемому для слоев интерметаллических соединений (ИМС). Эти уравнения можно использовать для оптимистической верхней оценки в случае, если поверхность контакта становится "самым слабым звеном" паяных соединений поверхностного монтажа. В этих случаях имеет место недостаточное смачивание припоем или внедрение слоистых структур между паяными соединениями и материалом подложки. Такими слоистыми структурами могут быть: слои металлизации, имеющие слабую связь с материалом подложки, недостаточно прочные сами по себе либо полностью растворимые в припое; слои окислов или загрязнений, препятствующие образованию прочной металлургической связи припоя с металлом площадки; наличие слоев хрупких интерметаллических соединений чрезмерной толщины, образовавшиеся в ходе высокотемпературных технологических операций, которые были слишком продолжительными, выполнялись при слишком высоких температурах, и/или таких операций было слишком много.

4.3.4 ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ 2 - Значительные колебания температуры Механизм разрушения паяных соединений, подвергаемых колебаниям температуры с большой амплитудой в диапазоне температур от -20 до +20°C, в котором происходит изменение реологических свойств припоя, не соответствует описанному в уравнениях 3 и 4 [1] (см. рисунок 7). Механизмы разрушения в данном случае определяются преимущественно перенапряжением и сильным разбросом свойств припоя.

4.3.5 ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ 3 — Высокая частота / Низкие температуры

В областях применения с высокой частотой, $f > 0{,}5$ Гц или $t_D < 1$ сек, например, в условиях вибраций, и/или при низкой температуре, $T_C < 0°C$, припой ведет себя подобно упругому материалу, вследствие чего релаксация напряжений и ползучесть не является преобладающим механизмом (см. рисунок 7). В этом случае рекомендуется применять соотношение Коффина-Мэнсона [5], описывающее усталость материала в отсутствие ползучести. Это соотношение, модифицированное для учета статистического распределения отказов, имеет вид:

$$N_f(x\%) = \frac{1}{2}\left[\frac{\Delta\gamma_p}{2\varepsilon_f}\right]^{\frac{1}{c}}\left[\frac{\ln(1-0.01x)}{\ln(0.5)}\right]^{\frac{1}{\beta}} \qquad (7)$$

где $\Delta\gamma_p$ = область циклических пластических деформаций,

$c \cong -0.6$

$b \cong 3{,}0$

Следует отметить, что $\Delta\gamma_p$ зависит от деформации, обусловленной несовпадением теплового расширения, и определяется пластической деформацией, отдельно от упругой составляющей.

4.3.6 ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ 4 — Локальное несовпадение КТР Для условий, в которых глобальное несовпадение теплового расширения очень мало, например, для пар керамика - керамика или кремний - кремний (паяные соединения флип-чипов), основной причиной усталостного повреждения становится локальное несовпадение теплового расширения. Уравнения 3 и 4 не распространяются на локальное несовпадение теплового расширения [16, 18]. Эта проблема надежности должна рассматриваться при помощи анализа пограничных напряжений [19] и соответствующих ускоренных испытаний.

4.3.7 ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ 5 — Несовпадение КТР на контакте вывод - припой

Для компонентов поверхностного монтажа с выводами, имеющих значительно меньшие КТР материала выводов, чем у сплавов на основе меди, в частности, ковара и сплава 42, результаты по уравнению 4 будут оптимистическими, поскольку вклад от несоответствия КТР материалов припой/вывод, т. е. локальное несовпадение КТР, не учитывается. При определенных обстоятельствах этом механизм может стать преобладающим.

4.3.8 ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ 6 — Очень жесткие выводы / Большое несовпадение тепловых расширений

Уравнения 3 и 4 различают безвыводные соединения поверхностного монтажа и соединения с гибкими выводами. Безвыводные паяные соединения предполагают наличие существенных пластических деформаций вследствие текучести прежде, чем начнутся процессы ползучести и релаксации напряжений, в то время как гибкие выводы препятствуют повышению напряжений в паяных соединениях до уровней, достаточных для возникновения существенного пластического течения.

Однако, существует промежуточная область, не предусматриваемая этими допущениями. Для очень жестких выводов с жесткостью порядка $K_D > \sim 500$ фунтов/дюйм и/или очень больших несовпадениях теплового расширения, приводящим к амплитуде деформаций $\Delta\gamma > \sim 10\%$, оценка повреждения по уравнению 4 может быть существенно ошибочной. В общем случае, необходимо относиться с предосторожностью ко всем случаям, у которых прогнозируемая долговечность $N_f(x\%)$ составляет менее 1000 циклов (см. также раздел 4.3.1).

Для очень жестких выводов напряжения, рассчитанные по уравнению 4, могут превосходить предел текучести припоя. Поскольку пластическое течение не допускает значительного превышения предела текучести приложенным напряжением, эти расчетная амплитуда напряжений будет завышать оценку циклического усталостного повреждения и, таким образом, приведет к существенно заниженным значениям усталостной долговечности по сравнению с прогнозируемыми. Чтобы избежать этой аналитической ошибки, необходимо ограничить диапазон напряжений в уравнении 4 пределом текучести при сдвиге. В уравнении 8 предпринята попытка ввести такое ограничение, а также учесть влияние гибкости вывода с помощью его высоты H; однако, между уравнениями 4 и 8 может иметь место нарушение непрерывности.

$$N_f(x\%) = \frac{1}{2}\left[\frac{2\varepsilon_f}{F}\,\frac{h}{L_D\Delta\alpha\Delta T_e}\,\frac{(200\ psi)\ H}{2\tau_\gamma h}\right]^{-\frac{1}{c}}$$

$$\left[\frac{\ln(1-0.01x)}{\ln(0.5)}\right]^{\frac{1}{\beta}}$$

$$\text{при } \Delta\tau = \frac{K_D L_D\Delta\alpha\Delta T_e}{A} > 2\tau_\gamma \qquad (8)$$

где

H = высота вывода от присоединяемого компонента до паяного соединения плюс h,

τ_γ = предел текучести припоя при сдвиге, полагая $\tau_\gamma = \sim$ от 1/5 до 1/10 напряжения сдвига при 50°C и низких скоростях деформации $\Rightarrow \tau_\gamma = \sim$ от 500 до 250 psi,

$\Delta\tau$ = диапазон циклических сдвиговых напряжений.

При очень больших несовпадениях теплового расширения деформации сдвига не будут передаваться паяным соединениям полностью; возможным исключением является ситуация с наличием очень жестких выводов, и в этом случае надежность лучше оценивать с использованием уравнения 3 для безвыводных паяных соединений. Предположив, что диапазон деформаций, не превышающий $\Delta\gamma_{max}$, может полностью восприниматься процессами ползучести и релаксации напряжений в паяных соединениях, оценку надежности для конструкций с очень большими несоответствиями теплового расширения можно представить в виде:

$$N_f(x\%) = \frac{1}{2}\left[\frac{2\varepsilon_f}{F}\,\frac{1}{\Delta\gamma_{max}}\,\frac{(200\ psi)\ A}{K_D L_D\Delta\alpha\Delta T_e}\right]^{-\frac{1}{c}}$$

$$\left[\frac{\ln(1-0.01x)}{\ln(0.5)}\right]^{\frac{1}{\beta}}$$

$$\text{при } \Delta\gamma = \frac{L_D\Delta\alpha\Delta T_e}{h} > \Delta\gamma_{max} \qquad (9)$$

Следует отметить, что уравнение 9 не описывает реальные физические процессы в паяном соединении при этих условиях; в нем только предпринята попытка ограничить значительное завышение оценки циклического усталостного повреждения.

В этих обстоятельствах уравнения 3 и 4 дают нижнюю и верхнюю границу оценок надежности, соответственно. Чем выше жесткость выводов, тем ближе ожидаемые результаты к получаемым по уравнению 3 для безвыводных паяных соединений, обладающих бесконечной жесткостью выводов. Очень высокая жесткость выводов может иметь место в случае, когда компонент с выводами, предназначенными для монтажа в отверстия, приспосабливается для поверхностного монтажа, а также при монтаже гребенок разъемов, когда штырьковые выводы гребенки просто изгибают в виде "крыла чайки" без уменьшения сечения вывода. Очень большие несовпадения теплового расширения имеют место преимущественно при ускоренных испытаниях и при неблагоприятных условиях хранения либо транспортировки изделий, предназначенных для легких условий эксплуатации.

4.4 Коэффициенты ускорения / преобразование ускорения

Для приведения результатов ускоренных испытаний в соответствие условиям эксплуатации, или даже просто для сравнения результатов ускоренных испытаний, проводившихся в различных условиях, должны быть известны коэффициенты ускорения испытаний. Для типичных ускоренных испытаний коэффициенты ускорения для приведения результатов к условиям эксплуатации рассчитываются либо по количеству циклов

$$A.F.(N) = \frac{N_f\ (use,\ 50\%)}{N_f\ (test,\ 50\%)} \qquad (10)$$

либо по среднему времени наработки на отказ (MTTF)

$$A.F.(t) = \frac{MTTF\ (use)}{MTTF\ (test)} = A.F.(N)\,\frac{f\ (use)}{f\ (test)} \qquad (11)$$

где f(use) и f(test) представляют собой циклическую частоту при эксплуатации и испытаниях, соответственно.

Для заданной совокупности характеристик припоя, зависящих от времени, температуры и напряжения, простые коэффициенты ускорения неприменимы, и необходимо задать закономерность преобразования ускорения. Данное преобразование ускорения позволяет осуществить экстраполяцию результатов ускоренных испытаний для прогнозирования надежности изделия в ходе эксплуатации. Оно позволяет также выполнить обоснованное сравнение результатов ускоренных испытаний, проводившихся в различных условиях, поскольку преимущественный механизм повреждения (усталость в результате ползучести) для них одинаков.

Преобразование ускорения получается из уравнений 3 - 5, если применить их для двух режимов термоциклирования, обозначаемых (1) и (2), и поделить уравнения друг на друга. Эти режимы, (1) и (2), могут быть как условиями испытаний, так и условиями эксплуатации, и из преобразования ускорения получается количество циклов для режима (2), $N_f(2)$, которое эквивалентно количеству циклов в режиме (1), $N_f(1)$, при одинаковой вероятности отказа:

$$N_f(2,50\%) = \frac{1}{2}\left[[2N_f(1,50\%)]^{c(1)}\frac{\Delta D(2)}{\Delta D(1)}\right]^{\frac{1}{c(2)}} \quad (12),$$

где для безвыводных соединений поверхностного монтажа

$$\Delta D = \left[\frac{F}{2\varepsilon_f}\cdot\frac{L_D\Delta\alpha\Delta T_e}{h}\right] \quad (13)$$

и для поверхностного монтажа компонентов с выводами

$$\Delta D = \left[\frac{F}{2\varepsilon_f}\frac{K_D(L_D\Delta\alpha\Delta T_e)^2}{(200psi)Ah}\right] \quad (14)$$

и где ΔD = потенциальное усталостное повреждение при циклическом нагружении после полной релаксации напряжений. Поскольку в преобразовании ускорения значения повреждения представлены в виде отношения, параметры, одинаковые для двух сравниваемых режимов, можно сократить.

Справедливость преобразования ускорения была продемонстрирована путем сравнения и корреляции результатов ускоренных испытаний на надежность, выполнявшихся при различных температурах и временах выдержки.

Из преобразования ускорения можно вывести коэффициент ускорения применительно к этим двум конкретным режимам.

$$A.F.(N) = \frac{N_f(use,\ 50\%)}{N_f(test,\ 50\%)} = \frac{[\Delta D(use)]^{\frac{1}{c(use)}}}{[\Delta D(test)]^{\frac{1}{c(test)}}} \quad (15)$$

В таблице 2 представлена информация из таблицы 1 в сочетании с гипотетическими примерами условий эксплуатации с использованием уравнений 12, 13, 14 и привлечением статистических распределений Вейбулла для определения эквивалентных средних значений циклической долговечности для режимов ускоренных испытаний, рекомендуемых в таблице 1 как для безвыводных паяных соединений поверхностного монтажа, так и для соединений с выводами. Эти эквивалентные циклы испытаний определяют диапазон "срока службы в годах" и "допустимого риска отказа" в таблице 1, но представляют собой среднее число циклов до отказа для условий испытания.

Приведенные в таблице 2 результаты показывают, что для более мягких условий эксплуатации (категории применения с 1-й по 6-ю) режимы испытаний дают высокие значения коэффициентов ускорения (см. также уравнение 11) в диапазоне от 75 до 4. Для более жестких условий эксплуатации ускорение испытаний сводится к минимуму или полностью исчезает. Это является результатом множества причин, например, жесткие температурные условия эксплуатации, длительные сроки службы и низкие допуски на однократные или совместные отказы. Этим отражается факт, что для подобных условий эксплуатации надежность продукции не может быть подтверждена опытным путем; при оценке гарантий надежности приходится полагаться исключительно на аналитическое моделирование надежности.

4.5 Статистические расчеты

Отказы паяных соединений поверхностного монтажа зависят в равной степени от физических причин, обусловленных накоплением повреждений от усталостной деформации, и соответствующих вероятностей отказа. Подобно другим отказам вследствие износа, возникновение отказов паяных соединений поверхностного монтажа распределено по относительно широкому диапазону долговечности. Это не происходит в результате каких-либо физических различий в паяных соединениях, по крайней мере на макроуровне, а определяется случайными причинами. Линеаризация отказов вследствие износа, как правило, наилучшим образом осуществляется при помощи статистического распределения Вейбулла. Это уже нашло отражение в уравнениях 3 и 4, где крайним справа членом представлено статистическое распределение Вейбулла для завершенного паяного соединения при поверхностном монтаже компонента или разъема.

Одинаковое несоответствие теплового расширения воздействует на паяные соединения неодинаково, это же относится и к степени усталостного повреждения, потому что они находятся на разных расстояниях от нейтральной точки компонента или разъема. Поэтому общее количество паяных соединений не может приниматься в качестве объема выборки. С целью проведения испытаний и в зависимости от размеров либо формы данные компонент или разъем можно разделить на два или четыре образца при соответствующей проработке спектров непрерывности. Однако, обработка каждого паяного соединения, как отдельного образца, основывается на неверном допущении, что все они имеют одинаковую вероятность отказа.

Это не означает, что не все паяные соединения дают вклад в вероятность отказа монтируемого компонента или разъема в целом; это, безусловно, имеет место. Однако, выполнять расчет этих вкладов по отдельности очень сложно и нецелесообразно. Уравнения 3 и 4 относятся к паяным соединениям, подверженным наибольшему циклическому усталостному повреждению - к соединениям по углам. Вклад других паяных соединений в вероятность отказа присоединенного пайкой компонента неявно учитывается в уравнениях 3 и 4, поскольку они основываются на экспериментальных результатах для компонентов, у которых все паяные соединения были включены в непрерывную последовательную топологию.

Поэтому разделение образцов для испытаний требует безусловного включения всех паяных соединений в непрерывную последовательную топологию, в которой каждая часть имеет равную вероятность отказа. В частности, каждая расчлененная последовательная топология требует включения одинакового количества угловых соединений. При проведении испытаний, в которых требуется доступ к внутренней поверхности компонента для выполнения циклических функциональных тестов с подключением питания, для этой цели следует выбирать ближайшие к нейтральной точке паяные соединения, дающие наименьший вклад, исключая их тем самым из непрерывной последовательной топологии.

Таблица 2 Эквивалентные усредненные циклы ускоренных испытаний для паяных соединений поверхностного монтажа по категориям применения в таблице 1

(если не указано особо, условия эксплуатации воспроизводятся по таблице 1)

КАТЕГОРИЯ ПРИМЕНЕНИЯ	ПРИМЕРНЫЕ УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ						УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ					
	Tmin °C	Tmax °C	ΔT °C	*h* час	Циклов в год	Риск	Tmin °C	Tmax °C	ΔT °C	*h* мин.	Срок службы Эквивалентные циклы,(1) N(test,50%)	
1) ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ ТОВАРЫ	+20	+55	35	12	365	1	+25	+100	75	15	1 год ll 320 ld 170	3 года ll 1050 ld 550
2) КОМПЬЮТЕРЫ	+25	+45	20	2	1460	0.1	+25	+100	75	15	1 год ll 470 ld 113	5 лет ll 2500 ld 600
3) ТЕХНИКА СВЯЗИ	+10	+45	35	12	365	0.01	+0	+100	100	15	7 лет ll 4700 ld 4100	20 лет ll 14600 ld 12900
4) ГРАЖДАНСКАЯ АВИАЦИЯ	+20	+40	20	12	365	0.001	0	+100	100	15	1 год ll 280 ld 120	20 лет ll 7400 ld 3200
5) ПРОМЫШЛЕННЫЙ И АВТОМОБИЛЬНЫЙ ПАССАЖИРСКИЙ ТРАНСПОРТ	+30 +20 - 5 15	+50 +60 +55 +65	20 &40 &60 &80	12 12 12 12	185 100 60 20	0.1	0	+100	100	15	1 год ll 400 ld 660	10 лет ll 5000 ld 8000
6) ВОЕННАЯ АППАРАТУРА НАЗЕМНОГО И МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ	+5 - 20	+45 +40	40 &60	12 12	100 265	0.1	0	+100	100	15	1 год ll 740 ld 1120	10 лет ll 8500 ld 13000
7) КОСМОС leo	20	+55	35	1	8760	0.001	0	+100	100	15	5 лет ll 5900 ld 77000	30 лет ll 350000 ld 460000
geo	+20	+55	35	12	365	0.001	0	+100	100	15	ll 7100 ld 12200	ll 51000 ld 87000
8) ВОЕННАЯ АВИОНИКА a	+25 +20	+65 +40	40 &20	2 1	365 365	0.01	0	+100	100	15	1 год ll 870 ld 290	10 лет ll 4800 ld 2800
b	+15 +20	+75 +40	60 &20	2 1	365 365	0.01	0	+100	100	15	ll 1020 ld 1600	ll 11900 ld 19000
c	0 +20	+80 +40	80 &20	2 1	365 365	0.01	0	+100	100	15	ll 2300 ld 6100	ll 22000 ld 70000
9) АППАРАТУРА ПОД КАПОТОМ АВТОМОБИЛЯ	+20 0 -20	+80 +100 +120	60 &100 &140	1 1 2	1000 300 40	0.1	0	+100	100	15	1 год ll 3500 ld 27000	5 лет ll 19000 ld 150000

& = в дополнение, ll = безвыводные, ld = с выводами   8700 циклов испытаний = продолжительность испытаний 1 год

1) Эквивалентные усредненные циклы не являются необходимой продолжительностью испытаний. Реальные значения длительности испытаний снижаются путем увеличения объема выборки и возрастания ускорения испытания, достигаемого за счет 1) повышенного Dα для тест-плат с преднамеренно введенным несогласованием КТР компонентов и испытуемых подложек, и/или 2) сокращенных времен выдержки при испытании, t_D. что возможно на испытательном оборудовании, способном обеспечить однородное распределение температур даже при заниженном времени выдержки. В стандартных промышленных климатических камерах применяется время выдержки, равное 15 минутам.

Например, при объеме выборки n = 32 количество циклов уменьшается до N(test,3%) = 0,46 N(test,50%) и 0,21 N(test,50%) для безвыводных соединений ПМ с $\beta = 4$ и паяных соединений с выводами и $\beta = 2$, соответственно (см. уравнение 17). Удвоение $a\Delta\alpha(2) = 2\,\Delta\alpha(1)$ при термоциклировании от 0 до 100°С при t_D = 15 минут дает $N_f(2,50\%) = 0,19$, $N_f(1,50\%)$ и 0,036 $N_f(1,50\%)$ для безвыводных соединений и соединений с выводами, соответственно (уравнение 12). Понижение $t_D(1)$ = 15 мин до $t_D(2)$ = 5 мин приводит к циклическому возрастанию $N_f(2,50\%) = 1,59\,N_f(1,50\%)$, но при этом время испытаний сокращается MTTF(2) = 0,53. MTTF(1) (см. уравнения 12 и 11).

Результаты испытаний с разбивкой компонентов или разъемов должны быть скорректированы с учетом этой разбивки. Коррекция должна осуществляться с использованием соотношения

$$N_f(\text{component}) = N_f(\text{m partitions})\left[\frac{1}{m}\right]^{\frac{1}{\beta}} \qquad (16)$$

Объем выборки зависит от цели и продолжительности ускоренных испытаний на надежность. Для испытаний, длящихся достаточно долго для того, чтобы половина образцов вышла из строя, рекомендуется минимальный объем выборки порядка 32.

Для уверенного определения уровней надежности в испытаниях с меньшей продолжительностью (максимальная совокупная вероятность отказа) необходимо принимать увеличенный объем выборки компромиссным путем с учетом сокращения времени. Компромиссное решение может быть найдено при помощи уравнения

$$N(\text{test},n,x\%) = N(\text{test},x\%)\left[\left[\frac{\ln(0.5)}{\ln(1-0.01x)}\right]^{\frac{c(use)}{c(test)}}\left[\frac{\ln\left(1-\frac{1}{n}\right)}{\ln(0.5)}\right]\right]^{\frac{1}{\beta}} \qquad (17)$$

где N(test),x%) получается из

$$N(\text{test},x\%) = \frac{1}{2}\left[[2N(\text{use},x\%)]^{c(use)}\frac{\Delta D(test)}{\Delta D(use)}\right]^{\frac{1}{c(test)}} \qquad (18)$$

и где

N(test,n,x%) = минимальное количество безотказных циклов испытаний для подтверждения максимальной совокупной вероятности отказа x% для n испытуемых образцов,

N(test,x%) = эквивалентное среднее число циклов до отказа в ходе испытания (см. таблицу 2)

x = допустимая максимальная вероятность отказа, %,

c(use) = показатель усталостной пластичности для данных условий эксплуатации из уравнения 5,

c(test) = показатель усталостной пластичности для данного режима испытаний из уравнения 5,

n = количество испытуемых образцов, независимо контролируемых в ходе испытаний,

β = наклон статистического распределения отказов Вейбулла,

N = расчетная долговечность изделия при допустимой совокупной вероятностью отказа x%,

ΔD(test) = выражение циклического усталостного повреждения для параметров испытаний из уравнения 13 или 14,

ΔD(test) = выражение циклического усталостного повреждения для параметров испытаний из уравнения 13 или 14.

Уравнение 17 дает минимальное количество безотказных циклов испытаний, которые необходимы для гарантированного получения совокупной вероятности отказа x при количестве индивидуально контролируемых испытуемых компонентов n в конце расчетного срока службы изделия.

5.0 ПРОЕКТИРОВАНИЕ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ К НАДЕЖНОСТИ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

5.1 Основные параметры проектирования

К параметрам проектирования, которые считаются имеющими первостепенное (по порядку величины) влияние на усталостную надежность паяных соединений ПМ относятся (см. также "Терминология и определения"):

5.1.1 Размер компонента

Физический размер компонента определяет величину деформации сдвига, которой подвергается паяное соединение при тепловом расширении/сжатии компонента и подложки, к которой он припаян. С увеличением размера компонентов надежность понижается.

5.1.2 Тип присоединения

Выбор типа присоединения (безвыводное или с выводами) определяет максимальный уровень напряжений, возникающих в паяном соединении при термоциклировании. Для жестких безвыводных соединений характерны напряжения в припое, превосходящие порог текучести; для соединений с гибкими выводами этого, как правило, не наблюдается. Этим выбором определяется модель для расчета надежности, которую следует применить; он также влияет на статистическое распределение отказов (наклон кривой распределения Вейбулла). Присоединения с выводами обеспечивают больший запас надежности, который возрастает по мере понижения жесткости выводов.

5.1.3 Высота паяного соединения

Высота паяного соединения определяет уровень напряжений, возникающих в нем при данной деформации сдвига в системе компонент/подложка. Они возникают в заполненном припоем промежутке между слоем металлизации или выводом компонента и площадкой на подложке. Столбик припоя увеличенной высоты понижает напряжения в паяном соединении и повышает надежность. Необходимо различать высоту паяного соединения и высоту галтели - это не одно и то же.

5.1.4 Площадь паяного соединения

Площадь паяного соединения определяет напряжения, возникающих в нем при данной деформации сдвига в системе компонент/подложка. Она имеет значение преимущественно для соединений с гибкими выводами. Увеличенная площадь паяного соединения способствует снижению приложенных напряжений и повышает надежность; однако возможный диапазон полезного увеличения площади весьма ограничен.

5.1.5 Жесткость вывода

Жесткостью выводов определяются силы, возникающие при данной деформации в системе компонент/подложка. Поскольку угловые паяные соединения подвержены деформациям в наибольшей степени, и сдвиг действует в направлении центра компонента (к нейтральной точке), преимущественное значение имеет диагональная жесткость. Понижение жесткости выводов способствует повышению надежности.

5.1.6 Коэффициент теплового расширения

Линейный коэффициент теплового расширения (КТР) выражает изменение линейного размера материала при изменении его температуры. Как правило, компоненты и подложки выполнены из разных материалов, имеющих отличающиеся КТР; эффективный КТР представляет собой сочетание КТР отдельных материалов и обычно имеет различные значения в разных направлениях относительно компонентов и подложки.

КТР должны измеряться и для изделия, и для тест-плат, чтобы избежать появления крупных ошибок прогнозирования надежности.

5.1.7 Несоответствие КТР

Несоответствие КТР (Δα) представляет собой разность коэффициентов теплового расширения (КТР) двух материалов или соединяемых деталей; в большинстве случаев это несоответствие КТР компонента и подложки, которое имеет наибольшее влияние, в то время как рассогласование по КТР между припоем и материалами, с которыми он связан (керамика, сплав 42, ковар), играет меньшую, но не пренебрежимо малую роль. В некоторых конструкциях (керамический компонент на керамической или кремниевой подложке) это несоответствие КТР приобретает первостепенное значение (см. "Несоответствие КТР припоя и материала основания", 5.2.1). Большие несовпадения по КТР представляют серьезную угрозу для надежности; подбор материалов по КТР не является оптимальным решением из-за диссипации энергии внутри компонентов.

5.1.8 Размах температурного цикла

Размах температурного цикла (ΔT) компонентов и подложки представляет собой разность максимального и минимального установившихся значений температуры, обусловленных воздействием внешних (ежедневных) колебаний температуры или воздействием режимов эксплуатации (включение/выключение, колебания нагрузки). Необходимо понимать, что размах температуры компонентов, как правило, не совпадает с размахом температур подложки из-за рассеивания мощности в активных элементах. Для простоты можно использовать эффективный размах температуры (ΔT_e) при учете несоответствия КТР компонента и подложки (см. "Несоответствие циклического расширения", 5.1.9). Меньшие значения ΔT повышают надежность.

5.1.9 Несоответствие циклического расширения Несоответствие циклического расширения ($\Delta\alpha\Delta T_e$) возникает в результате различия теплового расширения компонентов и подложки, определяемого по соответствующим коэффициентам теплового расширения (КТР) и размахам температурного цикла (ΔT). Меньшие значения несоответствия расширения повышают надежность.

5.2 Второстепенные параметры проектирования Несмотря на то, что влияние второстепенных параметров проектирования сами по себе имеют значимость второго порядка (коэффициенты от 2 до 3), их дополнительный вклад к воздействию параметров первого порядка может быть значительным. Влияние некоторых из этих параметров второго порядка может быть различным в ходе ускоренных испытаний и в реальных условиях эксплуатации.

Параметрами проектирования, оказывающими на надежность паяных соединений влияние второго порядка, считаются следующие:

5.2.1 Несоответствие КТР припоя и материала основания Несоответствие КТР (Δα) припоя и некоторых материалов подложки (керамика, сплав 42, ковар, кремний) может давать существенный вклад в циклическое усталостное повреждение (см. 5.1.7).

5.2.2 Форма/галтель/объем паяного соединения Влияние формы/галтели/объема паяного соединения на надежность доказано экспериментально. В некоторых существенно ускоренных испытаниях достигается повышение циклической долговечности в два раза, однако остается неясным, смогут ли эти небольшие преимущества дать результат для более длительных режимов, преобладающих в большинстве областей эксплуатации изделий. Улучшения достигаются за счет времени, необходимого для распространения трещины через галтель.

5.2.3 Однородность паяных соединений

Некоторые эксперименты, в которых паяные соединения подвергались преимущественно термомеханическим нагрузкам (высокие частоты циклов, отсутствие времени выдержки, очень большие амплитуды температур с резкими переходами), показали необходимость обеспечения исключительной однородности всех паяных соединений компонента для исключения неравномерных напряженных состояний. Проведение ускоренных испытаний с использованием режимов, приближенных к условиям эксплуатации изделия, не выявили необходимости в исключительной однородности паяных соединений.

5.2.4 Исходная кристаллическая структура паяных соединений Наличие исходной мелкозернистой структуры паяных соединений приводит к повышению циклической долговечности в значительно ускоренных испытаниях приблизительно в два раза. Кристаллическая структура припоя нестабильна по своей природе и со временем укрупняется; повышенные температуры и циклическая нагрузка ускоряют рост зерен. Таким образом, для большинства областей применения изделия исходная мелкозернистая структура не приведет к значительному повышению усталостной долговечности; паяные соединения тест-плат для ускоренных испытаний должны быть подвергнуты искусственному старению, чтобы начинать испытания со структурой зерна, более соответствующей имеющейся в изделии.

5.2.5 Влагозащитное покрытие

Влагозащитное покрытие может оказывать различное воздействие на долговечность паяного соединения в зависимости от типа материала, его толщины и места нанесения. Преимуществом влагозащитного покрытия является его способность замедлять поглощение воды и кислорода поверхностными трещинами. Наличие окислов на поверхности с трещинами может ускорить распространение трещин. Окисные слои препятствуют "консолидации" припоя при закрытии трещины.

Отрицательной стороной влагозащитных покрытий является внесение постороннего материала с высоким тепловым коэффициентом расширения, что может повлиять на надежность. Этот дополнительный вклад может быть значительным, если покрытие просачивается под компоненты, заполняя зазоры между ними и печатной платой. Кроме того, некоторые влагозащитные покрытия становятся жесткими ниже температуры стеклования. Это состояние может вызывать значительные напряжения в компонентах и паяных соединениях при термоциклировании.

Вследствие разнообразия свойств материалов влагозащитных покрытий, их толщины и методов нанесения, и т. д., влияние влагозащитного покрытия в общем случае должно оцениваться опытным путем.

4. Оснастка, например приспособления, выполненные из неанодированного алюминия, могут растворяться в припое во время процесса пайки.

5. Металлургическое загрязнение подложки, например, электроосаждение меди на печатной плате, может повлиять на паяное соединение, в частности, вызвать десмачивание.

Загрязнение	*Последствие*
Медь (> 0,3 %)	Увеличение вязкости припоя, повышенная твердость и соответствующее снижение усталостной долговечности.
Золото (> 0,2 %)	Возрастает хрупкость и видимая зернистость припоя.
Алюминий (> 0,006 %)	Припой становится пористым и принимает заиндевелый вид .
Серебро (> 5%)	Тусклый внешний вид и пониженная текучесть в процессе пайки.
Никель (> 0,1%)	Может образовывать пузырьки в припое и создавать твердые интерметаллические соединения, которые, в свою очередь, действуют как концентраторы напряжений во время усталостных циклов.

6.2.4 Объем припоя

Увеличение объема припоя выше "нормы" влияет на видимые свойства паяных соединений самым различным образом:

Тип возрастания	*Влияние на наблюдаемые свойства*
Высота соединения	Усталостная долговечность возрастает из-за понижения деформации, наблюдаемой в паяном соединении. Механическая прочность может несколько снизиться из-за незначительного влияния интерметаллидов, образующихся на контакте припоя с материалом основания.
Объем галтели	Увеличение объема припоя может способствовать улучшению характеристик механических и усталостных испытаний. Повышенный объем припоя приводит к возрастанию механической прочности (особенно при испытаниях на сдвиг) и усталостной долговечности (из-за возрастания длины трещины, необходимой для разрушения). Однако, увеличенные галтели могут разрушить компоненты, например, чип-конденсаторы, в результате приложения повышенных напряжений к компонентам.

Аналогично, уменьшение объема припоя ниже "нормы" влияет на видимые свойства паяных соединений различным образом:

Тип уменьшения	*Влияние на наблюдаемые свойства*
Недостаток припоя (галтель)	Недостаточный объем галтели припоя понижает механическую прочность паяного соединения. Следует отметить, что паяные соединения при надлежащем смачивании обладают достаточной механической прочностью. Таким образом, вероятность какого-либо понижения механической прочности не может оказаться значительной.
Пустоты	Пустоты в области галтели могут понизить механическую прочность и теплопроводящие свойства паяного соединения. Степень этого влияния зависит от размера, а также от количества и расположения пустот. Следует отметить, что если тепловые характеристики паяного соединения являются критическими, наличие пустот в припое приобретает важное значение. Этот эффект особенно заметен на тепловых площадках под компонентами, не имеющими внешних галтелей.

6.2.5 Влияние доработки паяных соединений, восстановления печатных узлов и ремонта

"Доработка" состоит в нанесении припоя и прогреве паяного соединения, которое кажется косметически несовершенным. Восстановление заключается в исправлении дефектов перед тем, как печатный узел ПМ покинет завод. Ремонтом называется устранение дефекта в условиях эксплуатации. Сведения о восстановлении и ремонте приведены в IPC-R-700. Каждое исправление требует нагрева одного или более паяных соединений выше температуры ликвидуса эвтектического оловянно-свинцового припоя (183°С) и может сопровождаться удалением или заменой компонента. Обратите внимание, что температура 183°С значительно превышает критические значения температур в печатных узлах ПМ:

параграфы с 6.2.5.1 по 6.2.5.6 посвящены влиянию температуры; параграфы с 6.2.5.7 по 6.2.5.11 посвящены другим вопросам, относящимся к восстановлению и ремонту.

6.2.5.1 Температура стеклования печатных плат
Температура стеклования (T_g) большинства плат на основе стеклоэпоксида составляет ~ 125°С. Значение T_g выше для печатных плат на основе полиимида, для которого T_g ~ 270°. Имеется множество других материалов для печатных плат, которые попадают в промежуток между этими крайними значениями. Превышение T_g для печатной платы приводит к ее значительному расширению в плоскости Z, а следовательно, к возникновению напряжений в металлизированных втулках сквозных отверстий и межсоединений; в результате втулка может разрушиться и стать причиной перемежающегося или постоянного обрыва цепи. Периодические обрывы цепи обычно обнаруживаются при изменении температуры печатного узла. Превышение T_g печатной платы приводит также к расширению печатной сборки в плоскости X-Y, что вызывает деформацию паяных соединений.

5.2.6 Податливые слои на поверхности подложки

Наличие податливых слоев на поверхности подложки может обеспечить дополнительный запас надежности, но они сами по себе не в состоянии нейтрализовать влияние сильного несоответствия тепловых расширений.

5.2.7 Состав припоя

Наиболее широко используемые составы припоя - эвтектический, а также припой с процентным содержанием олово/свинец, равным 60-40. Припои с другим составом могут иметь несколько более высокую или пониженную усталостную надежность и, в целом, изучены значительно в меньшей степени.

6.0 ПРОИЗВОДСТВО / ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

6.1 Управление технологическим процессом и контроль

Визуальный контроль паяных соединений ПМ не только весьма затруднителен, он к тому же и не очень эффективен. Маловероятно, что удастся обнаружить более 70% дефектов. Это означает, что даже двойной приемочный контроль не позволит заметить более 91% дефектов.

Наилучшим способом контроля изделия является контроль технологического процесса, в частности, с применением системы статистического управления производственными процессами (см. IPC-PC-90). Применяя статистическое управление процессами, можно обеспечить уровень приемки годных изделий на уровне порядка 50 ppm - 0,005%, что значительно ниже уровня возможностей визуального контроля.

Для этого необходимо выполнить исследование возможностей технологического процесса, которое даст информацию обо всех параметрах, влияющих на него. Должны быть оценены факторы воздействия каждой из переменных на технологический процесс и определено их влияние на статистическое распределение продукции. Затем должны быть установлены средства контроля процесса, чтобы привести распределение к допустимым пределам за счет настройки переменных и их удержания в соответствующих границах. Таким образом, изделие контролируется процессом, а не средствами визуального контроля либо измерений.

Проверка дополняется мониторингом трендов и распределений, чтобы не допускать выхода за пределы допустимых отклонений. Можно практиковать выборочный контроль продукции, но он должен быть сосредоточен на деталях контролируемых параметров, а не на визуальном контроле.

6.2 Последствия дефектов

Последствия дефектов, как при изготовлении подложки для испытаний, так и для паяных соединений, должны учитываться при составлении плана испытаний (см. J-STD-001). Если целью испытаний является проверка новой конструкции или производственного процесса, то наличие дефектов может маскировать реальные характеристики тест-платы (например, частичное несмачивание может стать причиной преждевременного отказа паяных соединений, что может быть ошибочно истолковано, как отказ оригинальной конструкции).

С другой стороны, если целью испытаний является определение влияния данного типа дефектов на надежность аппаратуры, наличие дефектов этого типа может быть не только желательным, но и необходимым. Следует отметить, однако, что испытания этого типа с трудом поддаются контролю. Изучаемые дефекты должны создаваться таким образом, чтобы имитировать реальную ситуацию, и в то же время обеспечить достаточное количество дефектов для проведения статистически значимого испытания.

6.2.1 Дефекты смачивания

Плохое смачивание компонентов или проводников может повлиять на результаты испытаний на надежность самым различным образом (см. IPC-S-816, J-STD-001, J-STD-002 и J-STD-003):

a) Плохое смачивание может стать причиной неполного формирования паяного соединения, что приведет к низкой надежности при проведении механических или усталостных испытаний.

Кроме того, "пятнистое" смачивание может привести к образованию концентраторов напряжений, что существенно повлияет на результаты испытаний на долговечность.

b) Плохое смачивание является признаком слабой металлургической связи между спаиваемыми элементами. По этой причине при проведении механических и усталостных испытаний будут получены неудовлетворительные результаты.

c) В предельных случаях из-за отсутствия смачивания незащищенный металл основания может подвергаться воздействию на следующей технологической операции. Впоследствии это может привести к отказам, связанным с коррозией и металлургическим/химическим загрязнением.

Недостаточное смачивание может быть вызвано проблемами паяемости вследствие загрязнения и окисления поверхности, недостаточным формированием интерметаллических соединений из-за выполнения процесса оплавления с нарушением температурных и/или временных режимов, а также неправильным выбором материалов.

6.2.2 Влияние поверхностных загрязнений

Загрязнение выводов компонента или контактных площадок подложки перед пайкой может препятствовать формированию качественного паяного соединения.

Типичными вредоносными загрязнителями являются кремнийорганические, минеральные и растительные масла, мази и смазки, которые могут появиться при переноске в виде отпечатков пальцев, следов крема для рук и пищи (шоколад, апельсины, напитки и т. д.); это могут быть оксиды, сульфиды и карбонаты, вызванные атмосферной коррозией.

Загрязнение паяных соединений после пайки может стать причиной коррозии (галогены, активирующие добавки флюса, моющие средства).

6.2.3 Влияние загрязнений припоя

Загрязнение припоя может радикальным образом повлиять на визуальные и механические характеристики паяного соединения. Загрязнение может произойти по различным причинам:

1. Изначальное загрязнение исходных материалов, в частности, припоя или паяльной пасты.

2. Металлизация выводов компонентов, в частности, золото или серебро, или металлы основания, например медь, могут растворяться в припое во время пайки и постепенно наращивать уровень загрязнения по мере того, как компоненты проходят через припой.

3. Последующая диффузия металлизации или металла основания в припой могут увеличить толщину интерметаллического диффузионного слоя.

Печатные платы с пониженным T_g, например, стеклоэпоксидные, при локальном нагреве до температур $>T_g$, в частности, при удалении или замене компонента, обнаруживают тенденцию к вспучиванию в зоне нагрева. Паяные соединения компонента-заменителя будут при этом подвергаться растяжению и могут повредиться при охлаждении печатного узла.

6.2.5.2 Рост интерметаллических соединений

Медь в проводниках печатных плат и выводах компонентов отлично растворяется в олове припоя. Благодаря этому чистая медь имеет превосходную паяемость. Олово и медь быстро реагируют при повышенных температурах с образованием интерметаллических соединений (ИМС) типа Cu_3Sn и Cu_6Sn_5 . Длительное воздействие высоких температур приводит к образованию избыточных количеств ИМС. Содержание олова в исходном припое, прилегающем к слою ИМС, будет уменьшаться, что приведет к образованию слоя, обогащенного свинцом. В случае тонких слоев припоя обогащенный свинцом слой обнажается и окисляется; в итоге из-за окиси свинца поверхность теряет способность к пайке.

В паяных соединениях хрупкий слой ИМС имеет тенденцию действовать как плоскость сдвига при растягивающем режиме нагрузки.

Если расплавленный слой припоя удалить с площадки путем протирки, обнаженные слои ИМС могут быстро окислиться и потерять способность к пайке.

Если источником тепла является припой (волна или фонтан), интерметаллиды будут уноситься по мере образования и в предельном случае медная площадка растворится.

6.2.5.3 Температура стеклования пластмассовых корпусов Диапазон значений T_g для большинства типов формовочных материалов, используемых для герметизации пластмассой полупроводников и пассивных сборок лежит в пределах ~ 150°С - 180°С.

Превышение T_g формовочного компаунда компонентов при их извлечении приводит к возникновению внутренних напряжений в слоях металлизации и защиты кремниевого чипа. Это повреждение может препятствовать анализу отказа удаленного компонента и отрицательно повлиять на соседний компонент. Разрыв металлизации может вызвать появление обрывов и нарушение работоспособности микросхемы. Повреждение защитного слоя (пассивации) может вызвать продолжительную коррозию и обрывы в металле. Превышение T_g может также вызвать отслоение формовочного компаунда от поверхности чипа или от поверхности выводной рамки; конденсированная влага будет накапливаться на обнаженных участках, что приведет к образованию дендритов и коррозии. В местах, где отслоение совпадает с контактными площадками и проводными соединениями, может произойти срез контакта.

При использовании горячего газа или инфракрасных систем для удаления либо замены компонентов просушите компонент перед извлечением, если в дальнейшем предполагается проанализировать причину его отказа. Защищайте соседние компоненты и соединения от нагрева при помощи дефлекторов горячего воздуха и инфракрасных защитных экранов.

6.2.5.4 Влияние давления пара на компоненты, герметизированные пластиком

Конденсированные пары воды на межфазных границах внутри герметизированного пластмассой компонента поверхностного монтажа (PSMC) быстро превращаются в пар и могут вызвать расслоение между формовочным компаундом и различными элементами, например, выводной рамкой, штифтами крепления или поверхностью чипа/кристалла.

Это явление обычно происходит при температуре ~220°С. В особо восприимчивых компонентах пороговая температура может быть ниже 220°С. В худшем случае отслоение формовочного компаунда может сопровождаться образованием непрерывной трещины между кристаллом и наружной поверхностью корпуса, создавая возможность материалам типа флюса или промывочных жидкостей проникать в корпус.

Эти материалы в присутствии воды вызывают коррозию металлизации кристалла. В дополнение, при наличии постоянного напряжения между полупроводниками возможно образование дендритов. Даже при отсутствии внешних трещин из формовочного компаунда или на поверхности чипа могут выделяться ионизируемые вещества (например, из диоксида кремния, легированного фосфором); эти материалы совместно с конденсированной водой захватываются областями расслоения и с течением времени становятся причиной образования коррозии и дендритов.

При использовании горячего газа или инфракрасных систем для извлечения либо замены компонентов просушите компонент перед извлечением, особенно если в дальнейшем предполагается проанализировать причину его отказа. Защищайте соседние компоненты и соединения от нагрева при помощи дефлекторов горячего воздуха и инфракрасных защитных экранов. При использовании горячего газа или инфракрасного излучения для удаления компонента с превышением температуры ~ 260°С более 10 секунд повторное использование этого компонента не рекомендуется, особенно в случае восприимчивости компонента к образованию трещин в корпусе, и если он не был просушен перед извлечением.

Характеристика чувствительности пластикового корпуса заменяемых деталей к образованию трещин определяется по методикам, приведенным в IPC-SM-786 или IPC-TM-650, метод 2.6.20.

6.2.5.5 Влияние давления пара на печатные платы

Стеклоэпоксидные или стеклополимерные межфазные поверхности могут отделяться или отслаиваться с образованием "пятен" при продолжительном нагреве свыше ~260°С. Это явление имеет место при температуре 260°С для стеклоэпоксидных плат и при более низких температурах для стеклополиимидных плат, подвергаемых воздействию влажной среды. Электропроводные анодные волокна (CAF) могут образовывать проводящие каналы высокого или низкого сопротивления между проходными втулками или металлизированными отверстиями. Большинство стеклополимерных материалов для печатных плат должны проверяться при 260°С на склонность к появлению пятен при "плавании в припое". Повышенная восприимчивость к образованию пятен или расслоению отмечается в случае, когда полимер имеет значительное содержание влаги; полиимид или подложки на основе полиимида должны просушиваться перед воздействием высокой температуры.

При использовании горячего газа, инфракрасного излучения или ручных паяльников при снятии либо замене компонентов просушите подложку в печи при 125°С в течение 24 часов перед воздействием высокой температуры и сведите к минимуму время воздействия этой температуры на печатную плату. Применяйте термометрию для измерения и контроля температуры подложки и компонента в ходе его снятия либо замены; отмечалось использование температуры струи газа >350°С при монтаже систем для быстрого снятия компонентов.

6.2.5.6 Влияние температуры плавления припоя

При температурах, необходимых для плавления припоя, адгезионная связь медного проводника с печатной платой ослабевает. Энергичное использование паяльника для перемещения или удаления припоя, перемещение вывода компонента при его подъеме, установке в отверстие или изгибе до того, как припой полностью расплавится, может привести к отслоению или полному отрыву площадки или проводника, после чего проводник придется ремонтировать. Аналогичным повреждением сопровождается преждевременный подъем или вращение компонента перед тем, как припой расплавится полностью.

6.2.5.7 Резкий рост температуры (ΔT) и скорость изменения температуры (dT/dt)

Если расплавленный припой при доработке, восстановлении или ремонте контактирует с выводами многослойного керамического конденсатора (МСКК), многослойной керамической индуктивности или многослойного керамического фильтра, и скорость возрастания температуры превышает 4°С/сек, вследствие теплового удара могут появиться трещины. Трещины возникают в керамическом корпусе под выводами и невидимы для визуального осмотра, но создают возможность образования дендритов в этой области в условиях влажности и разности электрических потенциалов. Большинство поставщиков МСКК рекомендуют значение ΔT <100°С. Некоторые паяльники, настроенные на 800°F или 427°С, обладающие достаточной тепловой массой наконечника, смоченного припоем, могут передавать тепло с такой скоростью, что в керамике под выводами появятся трещины. Для предотвращения образования трещин этого типа может потребоваться предварительный нагрев компонента до температуры выше 150°С, но при этом могут повредиться другие компоненты или печатная плата. Проблема трещинообразования в МСКК при тепловом ударе наиболее выражена для конденсаторов большой емкости, имеющих большую толщину; другими параметрами, повышающими восприимчивость к тепловому удару, являются многослойность, высокая диэлектрическая постоянная или низкое номинальное рабочее напряжение. Потребуйте у поставщика компонентов предоставить Вам данные относительно ΔT и dT/dt, при которых конкретный конденсатор (тип диэлектрика, номинал, рабочее напряжение, тип корпуса, ТКЕ) сохраняет стойкость; эти данные могут ограничить ваш выбор - либо номиналов (параметров) компонента, либо поставщиков.

6.2.5.8 Чистота поверхности печатных узлов

В случае использования водорастворимых или других флюсов позаботьтесь о том, чтобы печатные узлы были очищены по крайней мере до ионного уровня загрязнения, желательного на первой стадии испытаний. В противном случае могут развиться долгосрочные механизмы разрушения с образованием трещин в паяных соединениях из-за возникновения коррозионных напряжений, а также дендритов на поверхности печатной платы, ухудшающих характеристики сопротивления изоляции поверхности (что особенно важно для аналоговых приборов с высоким импедансом). См. также комментарии по отмывке в разделе "Влагозащитное покрытие".

6.2.5.9 Изгиб печатных узлов

Чрезмерный изгиб печатных узлов из-за воздействия ударов и вибрации либо при выполнении восстановительных или ремонтных работ может привести к образованию трещин в корпусе компонентов, обрыву выводов либо к перегрузке и отказу паяных соединений.

6.2.5.10 Воздействие инструмента

Удары, наносимые твердым инструментом по керамическому корпусу или выводам компонента могут привести к образованию трещин и изломов в корпусе компонента.

6.2.5.11 Электростатический разряд (ESD)

Примите меры электростатической защиты при обращении с печатными узлами, при их испытаниях и транспортировке во избежание образования скрытых дефектов.

6.3 Свойства материалов

Материалы, обычно используемые в производстве печатных узлов, зачастую имеют очень широкий разброс свойств в зависимости от температуры, при которой материал используется. Поэтому испытатель должен тщательно выбирать условия проведения ускоренных испытаний, чтобы они не вызвали неожиданных изменений свойств материалов и не повлияли на достоверность результатов.

6.3.1 Свойства припоя

В припое наблюдаются значительные колебания предела прочности на сдвиг, удлинения при разрыве и усталостной долговечности в зависимости от температуры и интенсивности деформаций. Пример такого непостоянства показан на рисунке 8, на котором сравниваются значения предела прочности на сдвиг для припоя 60/40 при различных температурах и скоростях деформации. Обычно с повышением температуры и уменьшением скорости деформации припой теряет прочность и приобретает пластичность.

Припою требуется достаточное время для диссипации напряжений в соединении, чтобы воздействие теплового цикла было выражено полностью. В результате времена выдержки при низких температурах должны быть значительно ниже, чем при высоких, чтобы релаксация напряжений в паяных соединениях могла завершиться полностью.

6.3.2 Материалы влагозащитных покрытий

Имеются сведения, что некоторые материалы влагозащитных покрытий, в частности, силикон или параксилен, способствуют повышению долговечности паяных соединений при термоциклировании, выступая преимущественно в качестве механического упрочнителя или газонепроницаемой оболочки.

У некоторых типов диодов в стеклянном корпусе, покрытых влагозащитным покрытием, трещины появляются при прогреве окружающей среды выше температуры стеклования T_g, и материал не размягчается в достаточной степени для восприятия напряжений, возникающих в стекле. В некоторых случаях для монтажа флип-чипов используются пластичные гели с очень низким значением T_g, чтобы свести к минимуму напряжения в паяных соединениях, возникающих при расширении. Материалы влагозащитных покрытий, как правило, не имеют наполнителя. Этот факт обычно приводит к очень высоким значениям КТР, особенно выше T_g, что важно, если изделие должно подвергаться колебаниям температуры в этом диапазоне при эксплуатации либо в ходе квалификационных испытаний.

Поставщики материалов для влагозащитного покрытия / связующего подслоя обычно располагают данными о величине T_g и КТР для своих материалов; если эти параметры не приведены в техническом описании, их можно затребовать дополнительно.

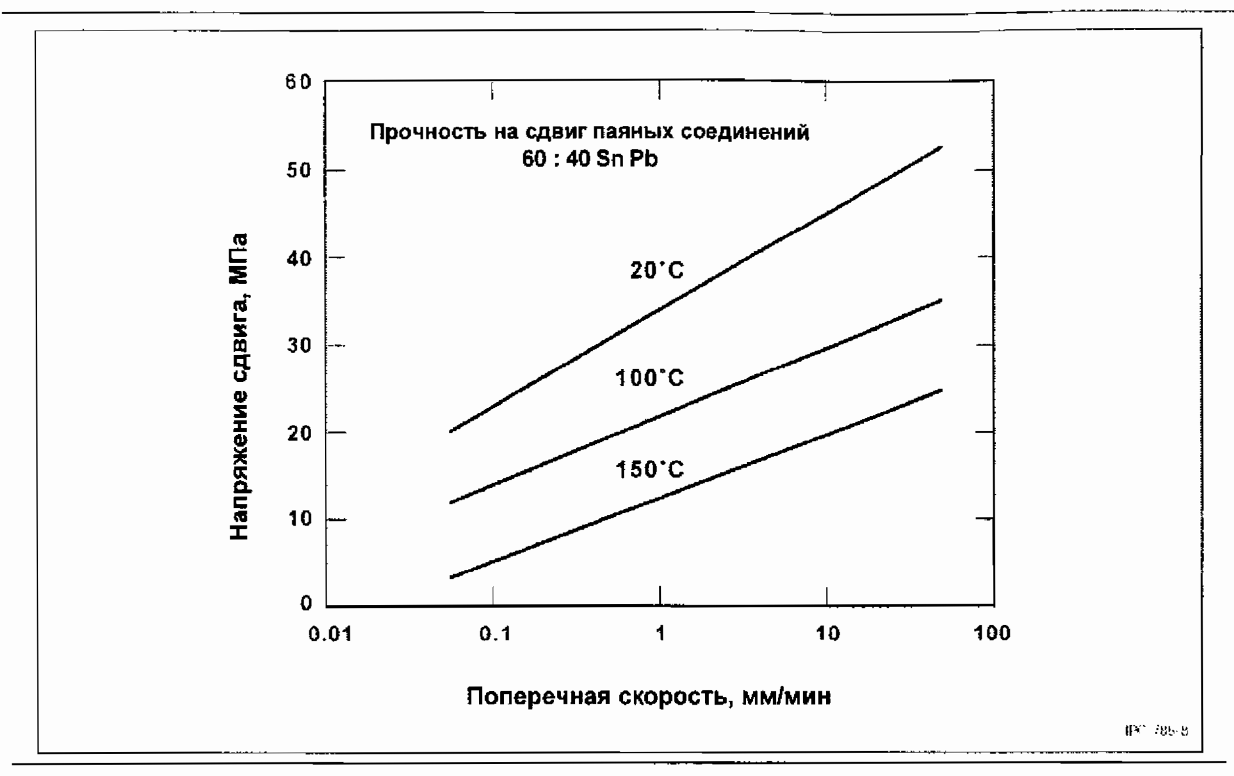


Рисунок 8 Зависимость предела прочности при сдвиге для припоя 60:40 SnPb от температуры и скорости деформации

Значения КТР при температурах ниже T_g для акрилов и эпоксидов лежат в пределах 40 - 90 ppm/°C, а для полиуретанов и силиконов - в пределах 100 - 300 ppm/°C. Проверьте зависимость модуля упругости и твердость от температуры в интересующем вас диапазоне, поскольку значения этих параметров для большинства полимеров при понижении температуры возрастают. Твердость некоторых силиконов при температурах ниже -20°C изменяется очень быстро.

Перед повторным нанесением любого влагозащитного покрытия поверхность печатных узлов и компонентов не должна содержать материалов (водорастворимых, жировых, маслянистых или ворсистых) которые могут выступить в качестве разделительного средства; в противном случае произойдет перемешивание или образование пузырей с последующей коррозией и ростом дендритов в местах, где проводники были обнажены или загрязнены.

6.3.3 Свойства компонентов

Для оценки и прогнозирования надежности паяных соединений должны быть известны значения КТР, свойственные материалам компонентов и корпусам, в которые они заключены. Справочные значения этих величин приведены в таблице 3. Реальные значения КТР должны быть измерены экспериментально.

Значения КТР (ppm /,°C) приводятся по материалам, опубликованным в "Technology Assessment of Laminates," IPC-TA-720, Materials for High Density Electronic Packaging and Interconnection, "Thermal Expansion Properties," "Electronic Materials Handbook, Volume 1, Packaging," и в другой технической литературе.

"Значение" КТР компонента в корпусе может зависеть от геометрии, относительного содержания полимерных и неорганических материалов, а также ориентации оси, вдоль которой измеряется КТР.

Значения КТР корпуса могут быть оценены на маленьких физических образцах при помощи термомеханического анализатора. Значения КТР можно оценить на более крупных образцах или для корпуса полностью при помощи дилатометра, которым располагают многие компании, предоставляющие услуги по проведению физических исследований. Эти системы требуют охлаждения (механическая рефрижерация или испарение сжиженных газов), чтобы обеспечить достаточную термостабильность при температурах около 25°C и работу в диапазоне до -55°C.

Кроме того, для оценки и прогнозирования надежности паяных соединений должна быть известна жесткость выводов K_D для компонентов, снабженных выводами. Эти данные можно получить у поставщика компонентов. Жесткость выводов может быть получена и расчетным путем (см. ссылки 8 -11).

6.3.4 Материалы печатных плат

Для оценки и прогнозирования надежности паяных соединений необходимо знать коэффициент теплового расширения (КТР) подложки в плоскости x-y. В таблице 3 приведены типичные справочные значения. Определение реальных значений КТР требует выполнения измерений.

Для выполнения полноценного моделирования значение КТР подложки должно быть строго определенным. Не следует использовать для этой цели справочные или литературные данные, потому что они чаще всего не учитывают компоновку и материалы, применяемые в конструкции действующей печатной платы, а также

реальное содержание смол, вследствие чего получаются ошибочные результаты.

Средством получения этой информации является тензометрия типичной печатной платы в направлениях x и y (наблюдаются значительные отличия) в условиях колебаний температуры, допускающих прямое измерение КТР (см. IPC-TM-650, разделы 2.4.41 и 2.4.41.1). Необходимо обратить внимание на то, чтобы использовалась репрезентативная печатная плата, и измерения выполнялись с обеих сторон для выявления влияния коробления, возникающего в результате несимметричности конструкции или отслоения сжимающей детали от активной части печатной платы.

Должна быть также известна температура стеклования, и к ней не следует приближаться в течение всего времени испытаний. Температура стеклования - это температура, при которой в аморфном полимере (или аморфных областях в частично кристаллизовавшемся полимере) происходит резкое изменение механических свойств (включая КТР, предел текучести и прочность на растяжение). При испытаниях выше температуры стеклования не только будут получены нерепрезентативные механические свойства в течение этой части цикла, зачастую они могут завершиться полной деградацией полимера за один цикл.

Таблица 3 Типичные значения коэффициента температурного расширения (PPM/$^{\circ}$C)

Изолятор / материал подложки / система	КТР нижнее значение	КТР типичное значение	КТР верхнее значение
Стекло E		5.5	
Стекло S		2.6	
Стеклокерамика		>3.0	
Кремний		2.6	
Алмаз		0.9	
Нитрид алюминия		4.5	
Нитрид кремния		3.7	
Кварц, плавленый кварц	0.5		0.6
Кевлар 49		-5	
Окись бериллия		6	
Кубич. нитрид бора X-Y Z		3.7 7.2	
Стекло E/эпоксид X-Y Z	14 55		20 90
Стекло E/полиимид X-Y Z	12	60	16
Стекло E/ПТФЭ X-Y Z		24 260	
Кевлар/эпоксид X-Y Z	5.1		7.1
Кевлар/полиимид X-Y Z	3.4	83	6.7
Кварц/полиимид X-Y Z	5.0	68.4	8.0
Кварц/бисмалеимид, 35% смолы X-Y Z	6.2	41	6.3
Осид алюминия (90%) ТП подложка		7.0	
Оксид алюминия (керамический кристаллодержатель)	5.9	6.5	7.4
Эпоксидный (70% кремнезема) пластковый корпус	20		23
Муллит совместного обжига		4.2	
Сплав 42		4.4	
Алюминий (40% кремния)		13.5	
Алюминий, Т6061		23.6	
Бор-алюминий (20%)		12.7	
Медь, CDA 101		17.6	
Медь/инвар/медь толщина 20/60/20	5.7		5.8
Медь/молибден/медь толщина 20/60/20		7	
Золото		14	
Графит/алюминий	4		6
Инвар 36		1.6	
Инвар 42		4.5	
Ковар		5	
Свинец		29	
Свинцово (95%) – оловянный припой		28	
Свинцово-оловянный припой 60/40	23		25
Молибден		4.9	
Молибден, плакированный Ni	5.2		6.0
Серебро		19	
Вольфрам/медь (90/10)	6.0		6.5
Вольфрам		4	

7.0 УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Целью ускоренных испытаний является достижение состояния отказа или накопление повреждений вследствие действия определенного механизма разрушения, но за время меньшее, чем потребовалось бы при эксплуатации изделия. Для достижения этого существует несколько общих способов. Интенсивность параметров, от которых зависит долговечность, может быть повышена для сокращения долговечности. Величина параметров, влияющих на долговечность, может поддерживаться на расчетном уровне, но воздействие выполняется с повышенной частотой, что приводит к сокращению продолжительности испытаний. Имеется также возможность применения этих двух подходов в сочетании.

Важно отчетливо понимать, что представляет собой переменная (или переменные), влияющая на долговечность, как она зависит от сущности проводимых испытаний и как скорость изменения и/или диапазон применения этой переменной влияет на долговечность. Особую важность имеет установление соотношения между ускоренным испытанием и реальными условиями эксплуатации, которые подвергаются ускорению. Часто ускоренные испытания приводят к повреждениям другого типа или не в должной степени соответствуют фактическим режимам применения. В таком случае ускорение будет неправомерным, и

его не следует использовать до получения ясного представления о том, каким образом данное ускоренное испытание коррелирует с условиями эксплуатации. Без такого понимания любые выводы, сделанные на основании ускоренных испытаний, будут, скорее всего, вводить в заблуждение, и поэтому использовать их нельзя. Например, нецелесообразно проводить испытания в диапазоне температур от -55 до +125°С, если в условиях эксплуатации температура находится в пределах от -20 до +100°С.

Хотя использование ускоренных испытаний и может быть опасным, поскольку они вносят факторы неопределенности, избежать их в общем случае нельзя, потому что проектируемая долговечность слишком велика для проведения испытаний в более реалистических условиях. Поэтому необходимо полное понимание того, что представляет собой явление, влияющее на реальный срок службы, и как ускоренное испытание соотносится с условиями эксплуатации.

Для выделения различных процессов разрушения существуют различные типы испытаний. Для ускорения механизмов разрушения, от которых зависит долговечность паяного соединения могут выполняться испытания на тепловую усталость, тепловой удар и/или вибрационные испытания. Выбор типа и условий испытаний должен осуществляться на основании соответствующих механизмов повреждения/отказа и условий эксплуатации, рассмотренных в разделах 3.4 и 3.5.

7.1 Программа/стратегия обеспечения надежности

Перед тем, как начинать выполнение программы обеспечения надежности, важно достичь понимания целей программы. Стратегия выполнения испытаний и расчетов может сильно изменяться в зависимости от конечной цели. Определение цели зависит от того, как много уже известно, какую новую информацию требуется получить, какие материальные и временные ресурсы имеются в наличии, каковы условия эксплуатации и расчетная долговечность изделия, приемлемый риск отказа и т.д.

На рисунке 1 приведена блок-схема с указанием шагов и решений, которые можно предпринять для выполнения соответствующей программы обеспечения надежности.

Для некоторых условий применения и нагружения количественного понимания все еще недостаточно для аналитического прогнозирования надежности; даже увязка результатов ускоренных испытаний с надежностью изделия для некоторых условий нагружения находится за пределами текущих возможностей. В связи с этим могут потребоваться обобщенные исследования механизмов разрушения для разработки соответствующих моделей прогнозирования надежности и коэффициентов/преобразований ускорения.

7.2 Обобщенные исследования механизма разрушения

Исследования, имеющие целью достичь качественного и количественного понимания механизмов разрушения, представляющих опасность для надежности, фундаментально отличаются от ускоренных испытаний на надежность. Несмотря на то, что оба типа испытаний требуют ускорения разрушения, различием их целей обусловлено различие требований, предъявляемых к уровню контроля изменений параметров и размеров образца, к испытательному оборудованию, технологии измерений, а также к затратам времени и ресурсов.

Например, в то время как для надежностных испытаний определение надежности должно быть надлежащим образом увязано с функциональным отказом изделия, в частности, электрический разрыв в паяном соединении, определение отказа для обобщенных исследований может быть выражено в виде понижения прочности, повышения электрического сопротивления, увеличения теплового сопротивления либо нарушения характеристической частоты.

Обобщенные исследования этого типа нужны, потому что формируют представления, необходимые для разработки моделей надежности, а также для определения наиболее эффективных рабочих условий.

7.3 Термоциклирование

Механизмы разрушения, вызванные термоциклированием, описаны в разделе 3.4.1. Важно обеспечить, чтобы выбранное испытание при термоциклировании создавало повреждения в паяных соединениях по тому же механизму, который действует при эксплуатации изделия. Имеется три основных используемых типа термоциклирования: функциональные циклы, температурные циклы и тепловой удар. Механизм разрушения при тепловом ударе обсуждался в разделе 3.4.3. Эти различные типы испытаний обсуждаются в последующих разделах.

7.3.1 Функциональный циклический режим

Функциональный циклический режим, как следует из его названия, заключается в моделировании условий эксплуатации, по возможности близким к реальным. Его выполняют, чтобы исключить неподдающееся оценке влияние на результаты испытаний многих свойств материалов, сильно зависящих от температуры. Таким образом, из результатов ускоренного испытания исключаются посторонние механизмы разрушения, и отражаются условия, воздействию которых изделие подвергается в ходе эксплуатации. Имитация условий эксплуатации должна включать внутреннюю диссипацию мощности в компонентах, колебания наружной температуры компонентов, теплопередачу и условия охлаждения, а также схему расположения монтажа.

Для упрощения ускорения испытаний и сведения к минимуму неконтролируемых воздействий необходимо осуществлять надежный контроль отклонения от условий эксплуатации только для одного или двух параметров. Параметром, который изменяется проще всего, обеспечивая ускорение испытаний и не внося при этом чрезмерных забот о различных свойствах материалов, является время выдержки при установившихся предельных значениях температуры. Уменьшение времени выдержки приводит к значительному снижению степени релаксации напряжений в припое и, следовательно, к меньшим усталостным повреждениям за один цикл. Поскольку в результате этого для наступления отказа при испытаниях требуется больше усталостных циклов, чем при эксплуатации, получаемое при испытаниях среднее время наработки на отказ значительно занижено, потому что на том же интервале времени возможно выполнение намного большего количества циклов.

Другим средством ускорения является повышение циклических усталостных нагрузок за счет увеличения несоответствия коэффициентов теплового расширения компонента и подложки и/или использование при испытаниях компонентов большего размера, чем у компонентов в изделии. Увеличение размаха циклической температуры ΔT *не является* хорошим средством ускорения для паяных соединений; во многих случаях увеличение ΔT, необходимое для существенного ускорения испытаний, приводит также к возбуждению новых механизмов разрушения и изменению свойств материала, что делает результаты испытаний сомнительными (см. раздел 4.0).

Таблица 4 Свойства слоистых материалов для печатных плат

Материал	Теплопроводность Вт/м*K	КТР в напр. X, Y ppm/°C	КТР в напр. Z, ppm/°C	Макс. температура применения °C	Температура стеклования °C	Прочность на растяжение МПа	Предел текучести МПа	Относит. удлинение %
Полимерные композиционные материалы:								
Полиимидное стекло	0.35	12-16	40-60	215-280	250-260	345	—	—
Стеклоэпоксид[a]	0.16-0.2	14-20	65	130-160	125-135	276	—	—
Модифицированный стеклоэпоксид[b]	—	14-16	—	—	140-150	—	—	—
Стекло ПТФЭ[e], нетканый материал	0.1-0.26	20	—	230-260	—	38-52	—	—
Стекло ПТФЭ[e], тканый материал	419-837	10-25	—	248	—	68-103	—	—
Эпоксидный арамид	0.12	6-8	66	—	125	—	—	—
Эпоксидный кварц	—	6-13	62	—	125	—	—	—
Полиимид арамид	0.28	5-8	83	—	250	207	—	—
Полиимид кварц	0.35	6-12	35	—	188-250	—	—	—
Эпоксидный кордиерит	0.9-1.3	3.3-3.8	—	—	—	—	—	—
Модифицированный эпоксидный арамид	—	5.5-5.6	100	—	137	—	—	—
ПТФЭ[e]	—	7.5-9/4	88	—	19[d]	—	—	—
Полимид	4.3-11.8	45-50	—	260-315	—	345-965	—	6.7
Металлические композиционные материалы:								
Медь/инвар/медь (20/60/20)	15-18[c]	5.3-5.5	16	—	Н/Д	310-414	170-270	36
Медь/инвар/медь (12,5/75/12,5)	14[c]	4.4	—	—	Н/Д	380-480	240-340	—
Cu/Mo/Cu	90-174	2-6	—	—	Н/Д	—	—	—
Ni/Mo/Ni	129.8[c]	5.2-6	5.2-6	—	Н/Д	621	552	50

a. FR-4, G-10 b. Полифункциональный FR-4 c. В направлении Z d. Полиморфный р e. PTFE - политетрафторэтилен

7.3.2 Термоциклирование

При термоциклировании тест-платы подвергаются поочередному воздействию высоких и низких температур с определенными временами выдержки. Во избежание теплового удара скорость изменения температуры не должна превышать 20°С/мин. Для создания повреждений от процессов усталости/ползучести рекомендуется диапазон температур от +25 до +100°С или от 0 до +100°С, в зависимости от области применения изделия (см. таблицу 1) с выдержками длительностью 15 минут при предельных значениях температуры.

В зависимости от применения возможно выполнение "холодного" циклирования от -40 до 0°С с временами выдержки, достаточными для восстановления теплового равновесия. Этот вид циклирования создает усталостные повреждения, которые не связаны с релаксацией напряжений и ползучестью в припое.

В устройствах, где изделие подвергается большим размахам циклического изменения температуры, например, категория применения 9 – "Аппаратура под капотом автомобиля" (см. таблицу 1), циклирование с "большим ΔT" подобно имеющемуся в действительности и рекомендуется использовать амплитудные значения температур, при которых будет работать изделие. Возникающие при этом механизмы разрушения многочисленны, не до конца понятны и взаимодействуют друг с другом; результаты термоциклических испытаний этого вида на данный момент не могут быть сопоставлены с другими условиями термоциклирования.

Важно, чтобы эти температуры, а также скорости нагрева и охлаждения измерялись на образце, а не только внутри установки для термоциклирования. Показания, измеренные на образце и в установке, используемой для нагрева и охлаждения, могут существенно различаться. Кроме того, эти различия зависят от многих переменных, в частности, от общей тепловой нагрузки, которая является функцией количества проходящих испытания образцов, тепловой массы каждого образца и установки, распределения образцов, а также скорости воздушного потока.

7.3.3 Циклический режим теплового удара

Механизм теплового удара обсуждался в разделе 3.4.3.

В испытаниях этого типа применяются скорости нагрева и/или охлаждения 30°С/мин и более. Жесткость испытаний возрастает по мере расширения диапазона температур и/или увеличения скорости изменения температуры. Среднее изменение температуры, развиваемое в испытаниях этого типа, приводит к созданию жестких градиентов температуры, которые деформируют печатную плату и компоненты, создавая растягивающие напряжения в паяных соединениях. В дополнение к этому создаются и напряжения сдвига, обусловленные несоответствием теплового расширения компонентов и печатной платы. Длительные времена выдержки способствуют релаксации этих напряжений за счет ползучести припоя в месте соединения компонента с печатной платой. Этим вносится дополнительный вклад в повреждение соединения и сокращается циклическая долговечность. Расширение диапазона температур способствует возрастанию термонапряжений и также сокращает долговечность, как и возрастание средней температуры, которое повышает степень ползучести в припое.

В экспериментах по надежностному проектированию не всегда обращают внимание на отличительные особенности теплового удара и термоциклирования. А между тем, тепловой удар и термоциклирование коренным образом отличаются. Основные отличия обусловлены механизмом нагрузки. Тепловой удар имеет тенденцию к созданию многоосных напряженных состояний с преобладанием растягивающих перенапряжений и усталости при растяжении. С другой стороны, как было показано ранее, термоциклирование приводит к появлению сдвигающих нагрузок и разрушение наступает вследствие взаимодействия усталости при сдвиге и релаксации напряжений. Тепловой удар осуществляется в двухкамерном испытательном оборудовании, в то время как термоциклирование выполняется в однокамерном оборудовании для циклических испытаний. Двухкамерные устройства могут обеспечить скорости изменения температуры, превосходящие 50°С/мин. Большинство однокамерных устройств обычно не могут обеспечить скоростей перехода, даже приближающихся к 30°С/мин, что является необходимым для создания термоудара. Результаты этих двух типов испытаний в общем случае несовместимы. В конечном счете, выполнение испытаний на тепловой удар с целью оценки надежности паяных соединений поверхностного монтажа необходимо лишь в случае, если тепловой удар является одним из действительных условий эксплуатации, воздействию которых подвергается изделие.

В некоторых нормативных документах не устанавливается полное различие определений термоциклирования и теплового удара; скорости изменения температуры позволяют более точно определить состояние, которое считается тепловым ударом.

7.4 Механическое циклическое воздействие

Механическое циклическое воздействие призвано вызвать отказы паяных соединений по механизму разрушения, имеющему место при термоциклировании, но при значительно более высоком ускорении испытаний. Механическое циклическое воздействие осуществляется при постоянной температуре; более высокие значения температур дают более значительное ускорение испытаний. Благодаря тому, что при изотермическом механическом циклическом воздействии не нужны длительные времена выхода на режим и отсутствуют неопределенности, связанные с тепловым равновесием, циклическая частота может быть очень высокой с длительностью выдержек в предельных положениях циклических перемещений порядка нескольких секунд.

Одним из путей ускорения механических циклических испытаний является увеличение прикладываемых нагрузок. Это очень просто, потому что нагрузки создаются за счет механической деформации подложки тест-платы или путем внешнего силового воздействия на компоненты. Во время испытаний необходимо уделять внимание предотвращению изменения характера отказа паяных соединений вследствие перегрузки, высокой скорости деформаций или подмены преобладающего механизма повреждения, усталости при сдвиге, на усталость при растяжении.

На практике образец для испытаний состоит из компонента поверхностного монтажа, припаянного на печатной плате; вся сборка приспособлена к приложению механической нагрузки. Печатную плату можно растягивать или сгибать; кроме того, имеется возможность приложения растягивающего усилия к компоненту с применением соответствующего клея. Поскольку температура поддерживается постоянной, тепловые свойства образца не имеют существенного значения.

Так как в испытаниях этого типа все термомеханические эффекты пренебрежимо малы, проведение этих испытаний полезно в целях сравнения различных конструкций паяных соединений. Однако, они не предоставляют сведений, которые могут быть непосредственно использованы для прогнозирования надежности изделия. Механическое циклическое воздействие можно сравнить с воздействием эталонного термоцикла, не включающим тепловой удар, что дает возможность определять приблизительные эксплуатационные характеристики изделия. Вследствие пренебрежения всеми термомеханическими эффектами, которые определенно играют важную роль в усталостных характеристиках припоя, а также из-за высоких коэффициентов ускорения этот тип испытаний выглядит вынужденным компромиссом, к которому прибегают "на скорую руку" в условиях ограниченности времени и ресурсов.

7.5 Вибрация

7.5.1 Условия воздействия вибраций

7.5.1.1 Случайная вибрация

По результатам исследований спектральный состав вибраций, воздействию которых подвергается электронная аппаратура, распределен в широком диапазоне частот. Это означает, что вибрации любой частоты присутствуют одновременно в различных сочетаниях по интенсивности. Эксперименты, проводимые в управляемых условиях, показали, что широкополосное воздействие при испытаниях можно успешно моделировать, применяя непериодическую (случайную) вибрацию.

Спектры непериодической вибрации определяются как профили спектральной плотности ускорения (называемой также спектральной плотностью энергии, или СПЭ), которые связывают уровни плотности энергии с определенными полосами частот. Вибрация определяется относительно соответствующего частотного диапазона.

Использование среднеквадратичных значений ускорения для описания вибрационных испытаний некорректно, поскольку среднеквадратичное значение ускорения не характеризует конкретный профиль вибрации. Одним среднеквадратичным значением ускорения можно описать бесконечное количество сочетаний частотных полос и спектральных форм. Поэтому при измерении величины и спектрального состава вибраций при испытаниях всегда необходимо соотносить энергосодержание с определенной полосой частот.

7.5.1.2 Задержки времени в источнике вибраций

В некоторых случаях условия вибрации характеризуются периодическим возбуждением, передаваемым от возвратно-поступательных или вращающихся систем и механизмов. Это возбуждение может передаваться через некую среду (воздух или жидкость), либо посредством элементов конструкции. Если эта форма возбуждения преобладает в критической полосе частот, уместно применить вибрацию с задержкой времени источника. Возбуждение от источника с задержкой может быть широкополосным случайным, случайным в узкой полосе частот, либо в виде одной или более синусоидальных волн.

Эта технология отличается от общепринятых синусоидальных резонансных испытаний с задержкой. Резонансная задержка выделяет те частоты, на которых резонирует испытуемый образец. Задержка времени источника выделяет те частоты, которые преобладают в окружении платформы. Очевидно, что спектр источника с задержкой времени обеспечивает более реалистические результаты испытаний.

7.5.1.3 Синусоидальная вибрация

Условия воздействия вибраций при эксплуатации винтовых самолетов и вертолетов характеризуется возбуждением, которое по своей природе является в основном синусоидальным. Возбуждение определяется скоростями вращения двигателя и винтов, частотой и скоростью движения лопаток турбины и лопастей несущего винта, а также их гармониками.

Условия подобные этим могут быть наилучшим образом смоделированы с применением синусоидальных испытаний. При этом следует удостовериться в том, что диапазон частот синусоидального воздействия является представительным для окружения платформы.

7.5.1.4 Влияние механического импеданса

Необходимо сделать поправку, учитывающую влияние механического импеданса, поскольку преимущества от приближения условий испытаний к реальным компенсируют затраты времени, усилий и денежных средств.

Реакция конструкции оборудования оказывает собственное динамическое влияние на функцию внешнего воздействия. На резонансных частотах конструкции, когда ответные воздействия возрастают, она нагружает прилегающие опорные элементы (то есть, создает провалы характеристики спектрально плотности ускорения на этих частотах). Величина влияния нагрузки определяется относительным импедансом конструкции оборудования и опорных элементов. Как известно из практики, резонирующий элемент создает нагружающую силу, пропорциональную его динамической массе, умноженной на соответствующий коэффициент усиления.

Влияние механического импеданса может давать свой вклад в образование спектра вибрационных испытаний. Глубина провалов определяется по результатам измерений или расчетным путем.

7.5.2 Ускорение воздействия вибраций

Рекомендуется выполнять вибрационные испытания только при наличии надежного крепления или на замкнутых системах, чтобы учесть точные характеристики резонансных частот и условия эксплуатации.

Существует три различных типа вибрационных испытаний, каждое из которых имеет самостоятельную цель.

1. Функциональные вибрационные испытания предназначены для проверки работоспособности оборудования при максимальном ожидаемом уровне вибраций. Продолжительность функциональных испытаний выбирается, как правило, достаточной лишь для того, чтобы удостовериться в работоспособности оборудования, или суммарно около одного часа вдоль каждой оси, по большему значению.

2. Испытания на стойкость проводятся с целью продемонстрировать, что оборудование обладает конструктивной и функциональной долговечностью, сравнимыми с контрактными требованиями. Уровни и продолжительность испытаний на стойкость устанавливаются путем подъема функциональных уровней и увеличением длительности испытания до возникновения усталостных повреждений, эквивалентным приобретаемым в течение срока службы. Это приводит к тому, что уровни вибрационных испытаний превышают максимально ожидаемые при эксплуатации, в некоторых случаях они намного выше. В испытаниях на стойкость не обязательно устанавливается усталостная долговечность, поскольку они не продолжаются до разрушения оборудования. Испытания на стойкость проводятся только в течение заданного периода времени. Статистически величина выборки слишком мала, чтобы адекватно определить усталостную долговечность.

3. При ускоренных испытаниях на долговечность применяются повышенные функциональные уровни, как и в испытаниях на стойкость, но испытания длятся до отказа оборудования. При этом должно использоваться несколько тест-плат, чтобы обеспечить статистическую достоверность ускоренной усталостной долговечности.

Для масштабирования уровней вибрации, продолжительности испытаний и вывода преобразований ускорения при нагружении случайной вибрацией часто используется упрощенное соотношение для усталости. В уравнении сравниваются два режима испытаний, 1 и 2,

$$\left[\frac{PSD_1}{PSD_2}\right]^M = \frac{t_2}{t_1} \qquad (19)$$

где

PSD = спектральная плотность энергии (ускорения) (G^2/Гц)

t = время (может измеряться в секундах, минутах или часах)

M = константа материала

и представлена линейная билогарифмическая зависимость PSD (СПЭ) от времени, отрицательный наклон которой равен 1/M, если откладывать время на горизонтальной оси. Уравнение (19) может быть представлено в виде соотношения Басквина для многоцикловой усталости или в виде общепризнанной кривой S/N, линейной двойной логарифмической зависимостью между напряжением и количеством циклов до наступления отказа. При сравнении этих двух соотношений надо быть внимательным, поскольку наклон кривых изменяется в два раза. При использовании уравнения (19), начальное значение M для паяных соединений находится в пределах от 3 до 4.

Небольшие отклонения значения показателя M, используемого в уравнении (19), могут вызвать существенное изменение прогнозируемой долговечности печатного узла, если уравнения используются для пересчета при переходе от одного режима к другому. Вероятность возникновения ошибки экстраполяции особенно возрастает, если долговечность по двум режимам отличается более, чем в десять раз.

Упрощенное соотношение для усталости, приведенное в уравнении (19), становится также сомнительным при высоких уровнях вибраций, обусловленных нелинейностью характеристик системы. При проведении ускоренных испытаний выбирайте их продолжительность с учетом целесообразности работы на низких уровнях вибраций. В случаях, когда это оправдано, можно воспользоваться более сложной методикой анализа.

7.6 Испытания на ползучесть до разрыва

Испытания на ползучесть до разрыва обычно выполняются в условиях приложения постоянной нагрузки. К образцу прикладывается нагрузка, и деформации, зависящие от времени, измеряются при помощи измерительного преобразователя перемещений LDVT или экстензометра. Типичное испытание на ползучесть до разрыва представлено на рисунке 9.

Обычно при испытаниях на ползучесть для металлов наблюдается три выраженные области. Область I соответствует начальной стадии ползучести. Для низкотемпературных припоев эта область имеет тенденцию к уменьшению. Область II соответствует установившейся стадии ползучести, при которой скорость деформации остается относительно постоянной. Установившаяся область представляет особый интерес при анализе взаимодействия процессов ползучести и усталости, поскольку установившаяся ползучесть имеет место в течение времени выдержки.

Область III соответствует третичной (ускоренной) ползучести, при которой происходит быстрое образование трещин по границам зерен вплоть до разрушения. Подготовка образцов для испытаний имеет большое значение. Основное влияние на характеристику ползучести припоев оказывает микроструктура. Размеры испытуемого соединения (толщина) должны быть репрезентативными для соединений, находящихся в эксплуатации

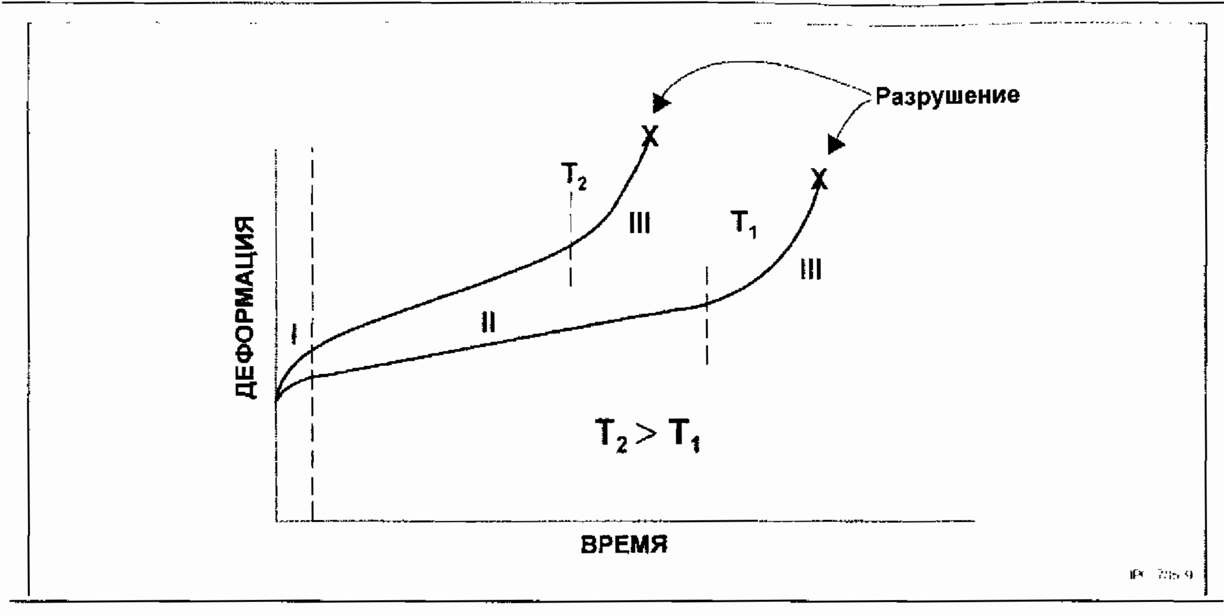


Рисунок 9 Характеристика ползучести в припое

Обрабатывайте соединения таким образом, чтобы обеспечить наилучшие конфигурации для испытаний припоев на ползучесть.

7.7 Испытания на механический удар

Испытания на механический удар представляют собой интенсивное ускорение, которое имитирует жесткие условия эксплуатации или случайное неправильное обращение. К этим условиям относятся мгновенно приложенные нагрузки или резкие изменения характера движения, вызванные небрежным обращением, транспортировкой или эксплуатацией в полевых условиях. Удары этой категории могут нарушить эксплуатационные характеристики или вызвать повреждение аналогичное тому, которое возникает при чрезмерной вибрации.

Для испытаний на механический удар применяются очень быстрые и резкие циклы нагружения. Обычно ударные импульсы имеют порядок от 500 до 30000 g с длительностью импульса от 0,1 до 1.0 миллисекунд. Высокая частота следования циклов позволяет проводить испытания с применением очень малых нагрузок или диапазонов смещения.

Механический удар характеризуется максимальной амплитудой, продолжительностью и ускорением, и обычно применяется к системе в виде толчка, импульса или шага. Реакция системы на удар зависит от природы удара, компоновки и материалов системы, ориентации системы относительно направления удара и резонансной частоты (или частот) системы. При небольшой длительности толчка или такта система может вибрировать на собственной резонансной частоте (частотах); амплитуда этих свободных колебаний со временем уменьшается в зависимости от демпфирующих свойств системы для диссипации механической энергии подобно тепловой.

Испытания на механический удар призваны дать количественную оценку надежности изделия или компонента в контролируемых лабораторных условиях, что предпочтительнее испытаний в реальных условиях эксплуатации по следующим причинам:

1. Временная диаграмма удара поддается контролю и может быть воспроизведена в целях сравнения; кроме того, ее можно изменять в диапазоне, выделенном из широко распространенных условий эксплуатации.

2. В условиях лаборатории возможна запись удара и реакции на него в реальном масштабе времени для дальнейшего анализа с целью внесения усовершенствований и немедленной перепроверки новой конструкции сборки.

3. Время и средства, затрачиваемые на проведение нескольких полевых испытаний, целесообразнее использовать для выполнения множества лабораторных испытаний.

На временную диаграмму установки для ударных испытаний может оказывать влияние масса и распределение масс печатной сборки ПМ, особенно если масса образца значима в сравнении с массой установки; установка для ударных испытаний должна быть как можно более жесткой и иметь собственные резонансные частоты, значительно превышающие ожидаемые для испытуемого образца.

Вид временной диаграммы удара выбирается, исходя из ожидаемого воздействия на образец для испытаний, либо определяется типом конкретной используемой установки.

Установки для ударных испытаний могут иметь различную конструкцию – от простейших машин с падающим столом и наклонными плоскостями до испытательных стендов с высоким ускорением, использующих газовую или пневматическую пушку.

7.8 Критерии отказа при испытании паяных соединений на усталость

Определение усталости паяного соединения и его последующее обнаружение не такая простая задача, как могло бы показаться (см. раздел 4.3.1). Часто сравнение результатов испытаний затрудняется либо вообще делается невозможным из-за несопоставимости критериев отказа. К эти критериям относится периодический визуальный контроль появления трещин в паяных соединениях, поиск нарушения структуры паяных соединений по снижению исходной прочности через определенные интервалы времени,

наблюдение петель гистерезиса напряжение – деформация для отдельных паяных соединений и определение отказа в терминах характеристик петель гистерезиса, контроль электрического сопротивления по величине возрастания относительно исходного сопротивления, а также мониторинг электрического сопротивления с целью обнаружения даже кратковременных электрических обрывов.

Критерии отказа, требующие периодического прерывания испытаний, могут значительно продлить время, необходимое для проведения испытаний, нарушить условия эксперимента и повлиять на результаты. Случайно выбранные определения отказа могут служить в качестве индикаторов разрушения лишь в случае, если они выполняются согласованно. Однако, наличие множества различных определений отказа и используемых методов измерений затрудняют сравнение.

Для проведения ускоренных испытаний на надежность рекомендуется использовать следующие критерии. Отказ определяется как первое прерывание электрической целостности цепи, которое подтверждено 9-ю дополнительными прерываниями в пределах дополнительных 10% от циклической долговечности.

Обнаружение отказа должно осуществляться путем непрерывного контроля последовательной топологии испытательных контуров следующим образом:

1. Не менее одного прерывания цепи продолжительностью не более 1 микросекунды может быть зарегистрировано для каждого измерительного контура в течение любого интервала опроса длительностью не более 2 секунд;

2. Не менее 10 таких прерываний на каждый измерительный контур может быть зарегистрировано для подтверждения индикации первого отказа;

3. Контрольный ток не превышает 2 мА при напряжении не более 10 В и разрыв электрической цепи определяется по сопротивлению контура, равному 1000 Ом или более. Проблемой может стать ложная индикация отказа, особенно при пороговом сопротивлении контура менее 1000 Ом.

Эти рекомендации учитывают ограничения, присущие имеющимся приборам контроля проводимости, а также наблюдаемые характеристики топологии измерительных контуров, содержащих поврежденные паяные соединения. Необходимо отметить, что мультиплексированный мониторинг, независимо от его скорости, ***не является*** средством непрерывного контроля, и его применение приведет к значительному запаздыванию обнаружения отказа относительно действительного момента разрушения паяных соединений.

7.9 Планирование ускоренных испытаний на долговечность

Определение методики проведения ускоренных испытаний на долговечность аналогично принципам планирования эксперимента, используемым в промышленности для оценки технологического процесса или изделия. В характеристике надежности важно установить параметры корреляции между ускоренным воздействием напряжений и внешними условиями при конечном применении.

При планировании эксперимента (ускоренных испытаний на долговечность) важно предусмотреть проверку одной или более независимых переменных, чтобы сравнить их с зависимой переменной. При испытаниях паяного соединения на надежность единственной зависимой переменной является количество циклов, воздействию которых подвергается оборудование. Циклическое воздействие имитирует эксплуатацию электронного оборудования и связывается с условиями обстановки конечного применения. Тогда независимыми переменными следует считать следующие:

• Размах колебаний температуры, напр., от +25 до +60°C

• Размеры компонента

• Коэффициенты теплового расширения

• Высота паяного соединения

• Жесткость выводов

• Вероятность отказа

7.9.1 Переменные параметры испытаний

При планировании эксперимента следует определить все параметры, которые являются его составной частью. Сюда включается идентификация переменных отклика, подлежащих исследованию.

Необходимо четко определить цель испытаний путем уточнения вопроса эксперимента, выдвигаемых допущений, оптимизации и т.д. Не должно оставаться никаких сомнений по поводу того, в чем состоит цель эксперимента или для чего он проводится.

Должны быть охарактеризованы и детально идентифицированы независимые переменные с особым упором на их взаимосвязь с исследуемой зависимой переменной. Независимые переменные подразделяются на четыре категории. К ним относятся:

• Параметры конструкции

• Параметры технологического процесса

• Параметры конечного продукта

• Параметры условий конечного применения

Важно определить целесообразность выбора и причину, по которой каждая из независимых переменных включается в план.

7.9.2 План испытаний

В плане испытаний должны указываться уровни или диапазон значений, при которых определяются независимые переменные.

Эти уровни являются настройками испытаний, и причины настройки диапазонов должны быть обоснованными.

План испытаний должен описывать схему эксперимента (полный факторный эксперимент, факторный эксперимент с дробными репликами и т. д.), используемую для исследования, и методику, по которой эксперимент выполняется (случайный, стратифицированный, производственное оборудование, лаборатория, и т. д.). В этом плане указывается метод измерений. Обычно это физический метод, используемый для измерения независимой переменной (например, по разрушению паяного соединения определяется усталостная долговечность).

Примером плана испытаний является циклическая программа IPC "Evaluation of Surface Mount Land Patterns," приведенная в IPC-SM-782, август 1988 г.

7.9.3 Методика подготовки выборки

В плане указывается объем и частота выборки. Сюда включается количество наблюдений зависимой переменной и временной интервал между выборками в условиях единичных испытаний. Приводится обоснование выбора объема и частоты выборки.

Благодаря типовым распределениям отказов, связанных с испытаниями на усталость, была установлена необходимость наличия не менее 32 точек данных на каждое из условий испытаний,

что позволяет выполнять обработку результатов испытаний (например, вычислять среднее количество циклов до отказа) с приемлемой статистической значимостью.

Некоторое внимание следует уделить использованию термина "экспериментальная точка". Если испытания связаны со сравнением достоинств одной топологии контактных площадок относительно другой, то для обоснования отличий потребуется 32 детали с использованием каждой из двух испытуемых топологий площадок. Было бы разумно, а на практике – желательно, чтобы оба проверяемых варианта располагались на одной и той же подложке, чтобы исключить любые другие посторонние влияния.

Если, с другой стороны, рассматривается другая макропеременная, скажем, конструкция печатной платы или параметр процесса оплавления, то каждая экспериментальная точка будет получаться при отдельном прохождении по процессу всей сборки в целом. В таком случае экономически целесообразно изготовить большое количество небольших упрощенных сборок.

7.9.4 Тест-платы

Конструкция тест-плат (ТП) должна допускать непрерывный электрический контроль в течение полного теплового цикла (см. рисунок 10).

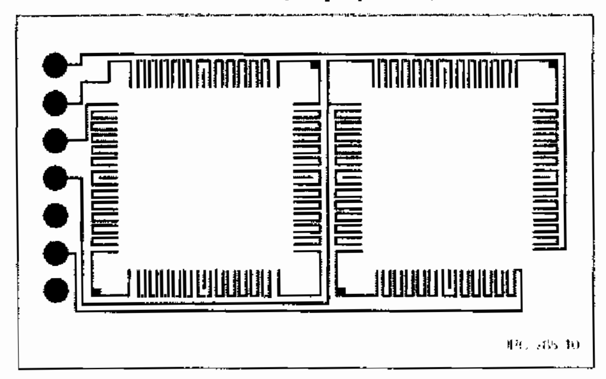


Рисунок 10 Пример топологии схемы

Все компоненты должны быть подготовлены для внутреннего межсоединения выводов таким образом, чтобы при соединении с рисунком подложки ТП образовалась завершенная топология измерительного контура. Предпочтительно по возможности выполнить соединение выводов внутри корпусов. Однако для некоторых компонентов (например, чипы, MELF) соединения выводов можно выполнить только снаружи. Крайне необходимо, чтобы эти внутренние или внешние соединения выводов не стали источником прерывания проводимости и тем самым не привели к ложной индикации отказов соединений поверхностного монтажа.

Схема соединений выводов зависит от количества входов/выходов компонента и выглядит следующим образом:

2 входа/выхода: соединить два вывода.

3 входа/выхода: соединить все три вывода вместе (как показано на рисунке 11).

4 или более входов/выходов: Соединить только выводы, расположенные на одной и той же стороне компонента. Начиная от углов, попеременно выполнять внутреннее соединение пар выводов, продвигаясь по направлению к центру соответствующей стороны компонента. Если вдоль стороны компонента расположено нечетное количество выводов, центральный вывод не подключается к измерительному контуру и на схеме соединений пропускается (см. рисунок 11).

Тест-платы должны по возможности точно воспроизводить испытуемое изделие в пределах ограничений, накладываемых рассматриваемыми переменными. Например, рассматривая конструкцию паяного соединения, испытатели зачастую предпочитают удалить ограничительный сердечник (повышая тем самым КТР), как средство ускорения наступления отказа. Этот технический прием обоснован, но при этом следует обратить внимание на то, чтобы при удалении сердечника другие переменные, кроме КТР, сохранили наиболее возможное подобие изделию. Измерение значений КТР абсолютно необходимо.

7.9.5 Приведение образцов к требуемым условиям

Тест-платы должны собираться и обрабатываться способом, наиболее близким к реальному изделию. Соответствующие изделию тест-платы должны отражать свойства паяных соединений изделия, в частности, кристаллическую структуру, состав, слои интерметаллических соединений и их толщину. Кристаллической структуре припоя присуща нестабильность; с течением времени и под воздействием температуры зерно укрупняется, особенно при наличии циклических деформаций. В изделиях наблюдалось значительное огрубление кристаллической структуры в течение одного года хранения.

Мелкозернистая структура паяных соединений приводит к увеличению усталостной долговечности при ускоренных испытаниях. При этом процессы укрупнения зерна, зависящие от времени, не могут развиться до той же степени, как при эксплуатации изделия в течение многих лет. Изменения в структуре припоя, которая претерпевает и накапливает усталостное повреждение, последовательно проходят стадии укрупнения кристаллической структуры, образования микропустот/раковин на границах зерен, образования микротрещин при остатке срока службы от 50 до 70 процентов, слияния микротрещин и разрушения. Поэтому очевидно, что ускоренные испытания тест-плат должны начинаться тогда, когда кристаллическая структура припоя в большей степени соответствует структуре зерна в изделии после некоторого периода эксплуатации. Это становится особенно важным при испытаниях с повышенной степенью ускорения.

После сборки тест-платы должны подвергаться ускоренному тепловому старению (например, 300 часов при 100°C для FR-4, 100 часов при 125°C для полиимида) на воздухе для имитации умеренного периода эксплуатации и ускорения таких вероятных процессов, как рост зерна в припое, рост интерметаллических соединений и окисление. Хранение тест-плат в течение некоторого дополнительного времени при комнатной температуре после искусственного старения перед началом испытаний на усталость способствует дальнейшей стабилизации структуры припоя.

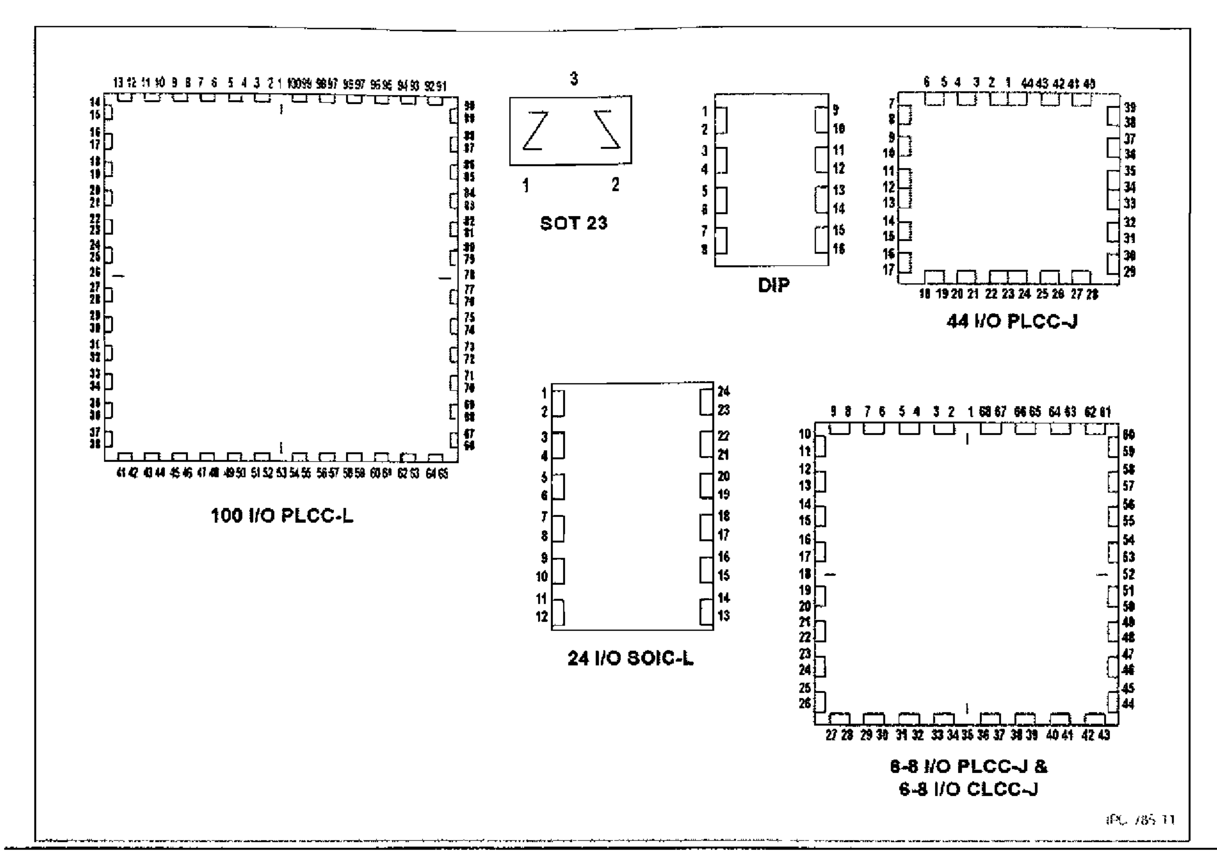


Рисунок 11 Схема внутреннего соединения выводов при нечетном их количестве на одну сторону

7.9.6 Выбор температурного цикла и контроль

Профили циклической температуры являются очень важной частью условий испытаний. Они должны измеряться на различных частях тест-плат и тепловой нагрузки, а также для режима в камере отдельно. Это необходимо, потому что 1) профили циклической температуры могут значительно отличаться для различных частей (компонент относительно печатной платы, центр тепловой нагрузки по сравнению с краями, и т.д.), и 2) режим в камере может существенно отличаться для различных положений внутри нее.

Предельные значения температуры при термоциклировании могут превышать встречающиеся при эксплуатации, но только в том случае, если в результате этого повышения не наблюдается существенного изменения свойств материалов. Соответствующие температурные режимы предлагаются в таблице 1. Примерами неудачно выбранных предельных значений являются:

a) Низкая температура выбрана значительно ниже встречающейся при работе, и в результате припой имеет существенно отличающиеся свойства по сравнению с теми, которые имел бы в условиях эксплуатации (например, слабо выраженные процессы ползучести/релаксации напряжений).

b) Выбранная высокая температура приближается к T_g слоистого материала, подвергаемого испытаниям.

Необходимо выбирать достаточную длительность времен выдержки, чтобы могла в значительной степени проявиться релаксация напряжений в соединении перед началом следующего температурного перехода.

Поскольку при испытаниях на тепловой удар действуют иные механизмы, чем ползучесть/усталость, скорость изменения температуры при испытаниях должна измеряться на поверхности печатного узла и для термоциклирования не должна превышать 20°С/мин.

7.9.7 Закрепление и размещение образца внутри камеры

Следует обратить внимание на закрепление образца перед испытаниями, поскольку положение и ориентация в камере часто оказывает существенное воздействие на скорость изменения и значения температур, которым подвергается данный печатный узел в ходе испытаний. Рекомендуется определять количество печатных узлов при подготовке к испытаниям, чтобы обеспечить однородность температуры и воздушного потока в камере во время испытаний. В качестве дополнительной меры защиты подвергаемые испытаниям образцы не должны группироваться по условиям испытаний; их следует распределять случайным образом для предотвращения искажения данных неконтролируемой или непредвиденной нестабильностью состояний в камере.

В завершение, необходимо проследить, чтобы печатный узел испытывался в условиях, воздействию которых он будет подвергаться при эксплуатации. Если потребуется провести достоверно репрезентативные испытания, то

придется разместить в камере блок, представляющий реальные условия использования, поскольку это сильно влияет на скорости изменения температур и времена выдержки, которым подвергается печатный узел при испытаниях.

Следует избегать размещения разъемов внутри испытательной камеры, потому что соединения разъемов могут способствовать ложной индикации отказов. Если по условиям испытаний применения разъемов избежать нельзя, они должны иметь высококачественные позолоченные контакты и не подвергаться значительным перемещениям при термоциклировании.

7.9.8 Анализ данных

Результаты испытаний должны быть проанализированы и оценены с использованием статистических расчетов, чтобы определить распределение отказов, независимость или взаимодействие переменных величин, отклонения от нормы и т.д. Кроме того, данные должны быть проанализированы с использованием информации, изложенной в разделе 4, чтобы подтвердить исходные прогнозы, определить расхождения фактора "неидеальности" F и корреляцию влияния различных независимых переменных, и т.д.

Необходимо проверить причины аномалий и отклонений, чтобы идентифицировать и отделить воздействие переменных величин испытаний от влияния, обусловленного отличиями тест-плат.

7.10 Анализ характера отказов

Анализ характера отказов (АХО) может дать ценную информацию относительно первопричин отказа. Это в равной степени справедливо для отказов изделий и для оценки результатов ускоренных испытаний на надежность. Для ускоренных испытаний на надежность АХО представляет особую ценность при определении причин неожиданных результатов и аномалий. АХО начинается с визуального анализа с повышением кратности увеличения, переходя к металлографическому контролю и, при необходимости, к аналитическим методам сканирующей электронной микроскопии, рентгеновским исследованиям спектра рассеивания энергии и Оже-спектроскопии.

Металлографические исследования паяных соединений и толкование причин отказа является сложной задачей. Крупнозернистость и колонии могут возникать из-за очень длительного воздействия относительно низких температур или из-за непродолжительного воздействия повышенных температур при циклической нагрузке. Слои интерметаллических соединений (ИМС) могут формироваться в ходе первоначального процесса пайки, во время ремонта соседних компонентов или в течение длительной эксплуатации при относительно умеренных температурах. Физик-аналитик должен прокомментировать положение и количество интерметаллидов, природу и относительные размеры зерен, возможную последовательность событий, которая привела к отказу соединения и методы предотвращения таких отказов в будущем. Селективное травление поврежденной поверхности может вскрыть структурные особенности быстрого роста зерен в расплавленном припое или медленный рост зерен, обусловленный диффузией в твердом состоянии. Методы рентгеновских исследований спектра рассеяния энергии или сканирующая электронная микроскопия Оже могут дополнить результаты оптической микроскопии, предоставляя количественную оценку относительного содержания олова, свинца, меди и других составляющих в паяном соединении; эти данные дают возможность определить металлы и их источники, которые могут привести к потере пластичности.

Вид поверхности излома предоставляет дополнительную информацию о механизме усталости. Транскристаллитный характер излома является характерным для усталости из-за перенапряжений. Преобладающая усталость из-за перенапряжений имеет место в случаях, когда паяное соединение подвергалось воздействию высоких уровней напряжений, обычно из-за очень высоких скоростей деформации при нагружении. Межкристаллитный характер излома характерен для отказа вследствие усталости из-за процесса ползучести. Отказ из-за усталостной ползучести наблюдается при низких уровнях напряжений. Примеры поверхностей излома приведены в 12-м томе справочника Metals Handbook.

Методы сканирующей электронной микроскопии / рентгеновской спектроскопии обсуждаются в "Solder Joint Reliability," глава 6. Металлография рассматривается в девятом томе "Metals Handbook", 9-е издание; тома 10 и 12 этой же серии посвящены определению характеристик и фрактографии материалов.

7.10.1 Оптическая микроскопия

Интерпретация среза/полированного или травленого образца паяного соединения требует:

a. опыта, накопленного аналитиком, или

b. доступа с целью сравнения к микрофотографиям образцов припоя и паяных соединений, полученных при известных значениях напряжений и сопровождаемых подробным описанием, а также воспроизводимой методики подготовки образцов.

Микрофотографии образцов этого типа приведены в публикациях Международного института исследований олова (ITRI) или публикациях Информационного центра олова № 580 и № 703. Другие микрофотографии опубликованы в "Solder Joint Reliability," глава 6 и 7.

7.10.2 Металлографическая подготовка

Подготовка оловянно-свинцовых паяных соединений к металлографическим исследованиям требует исключительного внимания. Образцы состоят из частиц интерметаллических соединений, обладающих высокой твердостью (медь - олово), распределенных в очень мягкой матрице (свинец, свинец - олово). Эта гетерогенная масса нанесена на твердый материал основания, состоящий из меди или сплавов железа. Свинцово-оловянная матрица может претерпевать рекристаллизацию при температурах, достигаемых во время отверждения эпоксидных монтажных материалов или отверждении термопластических монтажных материалов; рекомендуется применение полиэстеровых или акриловых монтажных материалов с возможно более низкой температурой отверждения. Высокая тщательность требуется при вскрытии недеформированной неповрежденной структуры под поверхностным слоем.

Общие комментарии по подготовке металлографических образцов, их монтажу и полировке приведены в IPC-TM-650, разделы 2.1.10 и 2.1.1.2, в IPC-MS-810, в руководстве "Guidelines for High Volume Microsection," и в издании корпорации Leco "Metallography Principles and Procedures", в котором также содержится перепечатка ASTM E407-70 и ASTM E340-68. В дополнение к этому, страницы 5-12 в публикации ITRI № 580 посвящены разрушающему физическому анализу (РФА) оловянно-свинцовых паяных соединений.

7.10.2.1 Резка

Первоначальным этапом металлографической подготовки является выделение компонента или паяного соединения для заливки.

Это влечет за собой применение алмазного круга, быстроходной абразивной пилы или аналогичного режущего устройства для извлечения образца. На первоначальном этапе необходимо учитывать несколько факторов:

1. *Место реза:* Извлечение образца должно осуществляться так, чтобы рез не располагался слишком близко к паяному соединению, представляющему интерес. Тем не менее, разрез должен располагаться достаточно близко, чтобы не потребовалась излишнее шлифование. При возникновении сомнений оставьте немного дополнительного материала. Обычно достаточно оставить 1/10 дюйма материала вокруг участка, представляющего интерес.

2. *Закрепление:* Следует соблюдать осторожность, чтобы не повредить образец при закреплении его для резки.

3. *Скорость резания:* Во избежание повреждения образца необходимо действовать плавно, поддерживая соответствующую скорость и усилие подачи. Не допускайте вибрации образца во время резки.

4. *Смазочно-охлаждающие жидкости:* При работе с абразивными кругами, особенно алмазными, необходимо использовать масло, воду или другие типы охлаждающей жидкости. Смазочно-охлаждающие жидкости выполняют две основные функции:

1. Удаление продуктов резания, обеспечивающее эффективный съем материала.

2. Отвод тепла, создаваемого в процессе резания. При необходимости выполнить резание без СОЖ следует соблюдать предельную осторожность, чтобы не допустить перегрева, который может повредить образец, в частности, паяные соединения или полимерные материалы.

Следует подбирать такую охлаждающую жидкость, от которой образец очищается легко и полностью, чтобы заливочный эпоксидный компаунд удерживался на поверхности образца.

5. *Меры предосторожности при работе с керамикой:* Вследствие твердости керамики на основе оксида алюминия для резки и шлифования образцов необходимо использовать оборудование, оснащенное алмазным инструментом. Кроме того, пыль материалов на основе бериллия и окиси бериллия чрезвычайно токсична, и обрабатывать эти материалы без смазочно-охлаждающей жидкости категорически запрещается.

7.10.2.2 Заливка

Образец необходимо поместить в жесткую среду для шлифования и полировки, чтобы получить плоскую однородную поверхность и защитить паяное соединение. Необходимо проследить, чтобы процедура заливки не изменила микроструктуру паяного соединения. Покрытие медью или никелем способствует защите легко деформируемых материалов. Существует два метода заливки:

1. *Быстрая заливка:* В этом методе используется термопластический материал, например, полиметилметакрилат, и обычно не дает полностью прозрачных образцов. Заполнение небольших пустот и адгезия к образцу может быть хуже, чем по методу медленной заливки. Однако заливку одного образца обычно можно выполнить приблизительно за 5 - 15 минут. Выделение тепла системами быстрой заливки изменяется в широких пределах от изделия к изделию.

2. *Медленная заливка:* В этом методе в качестве материала для заливки обычно используются эпоксиды.

Для удаления пузырьков воздуха и облегчения проникновения герметика в закрытые пространства можно использовать метод пропитки в вакууме. Для затвердевания герметиков они должны выдерживаться в диапазоне температур от 60 до 90°C; некоторые из них отверждаются при комнатной температуре, но могут создавать еще более высокие температуры за счет экзотермических реакций. Наличие этой проблемы можно обнаружить опытным путем, заливая пустые формы. Отводу избыточного тепла способствует отверждение в водяной ванне. Время заливки может колебаться в пределах от 1 до 8 часов в зависимости от материала и условий отверждения.

7.10.2.3 Подготовка к заливке

При заливке образца важно придать ему надлежащую ориентацию. Ориентация зависит от применяемого оборудования для шлифования и полировки, а также технологии. Эффективные приемы работы определяются практическим путем. Здесь приводятся два основных метода заливки:

1. *Вертикальная заливка:* Образец удерживается в вертикальном положении относительно дна формы при помощи клея или специальных зажимов. Затем в форму заливается капсулирующий материал до заполнения.

2. *Заливка наполовину:* Образец помещается горизонтально в форму, которая наполовину заполнена затвердевшим капсулирующим материалом. После размещения образца форму наполняют полностью и оставляют до отверждения капсулирующего материала. Затем образец шлифуют с боковой стороны, что затрудняет его установку в некоторые автоматические станки. При возникновении подобных затруднений следует использовать вертикальную заливку.

Примечание: В разделах описания данной методики, посвященных шлифованию и полировке образца, предполагается, что эти операции выполняются вручную. Тем не менее, большинство общих представлений справедливо и для автоматической обработки. Сделана попытка сгладить различия между этими двумя методиками.

7.10.2.4 Шлифование

Третий этап подготовки образца заключается в съеме материала для обнажения области, представляющей интерес. Шлифование – это абразивный процесс для медленного удаления деформированного поверхностного материала и вскрытия нижележащих недеформированных областей. Обычно шлифование выполняется при помощи наждачной бумаги на основе карбида кремния с последовательным изменением зернистости от 120 до 1000 в зависимости от количества подлежащего удалению материала. В течение этого этапа необходимо учитывать несколько факторов:

1. *Давление:* Величина прижима до некоторой степени определяется твердостью образца. Необходимо поддерживать легкий нажим во избежание излишней деформации поверхности образца.

2. *Время:* Время использования каждого куска шлифовальной бумаги должно быть непродолжительным. Излишнее время шлифования может вызвать фасетирование по мере износа и засаливания наждачной бумаги. Обычно фасетирование устраняется переходом к новому неизношенному куску наждачной бумаги.

3. *Смазочно-охлаждающая жидкость:* Как и на операции резки, жидкость используется для удаления продуктов износа и предотвращения перегрева образца. Наиболее распространенной СОЖ является вода.

4. *Керамические материалы:* Из-за высокой твердости керамических материалов для обработки компонентов, корпусов и подложек, изготовленных, в частности, из керамики на основе оксидов алюминия или бериллия, необходимо применять алмазные отрезные и шлифовальные диски. Механические процессы шлифования и полировки образцов бериллиевой керамики сопровождаются образованием пыли, которая считается опасным материалом; эта пыль должна устраняться при помощи соответствующей смазочно-охлаждающей жидкости. Требования OSHA (Управление США по охране труда и промышленной гигиене) и EPA (Управление по охране окружающей среды) по обращению с материалами отменяют любые другие технические требования по обработке или использованию материалов. Смесь пыли окиси бериллия с жидкостью считается опасным материалом; этот аспект должен учитываться при утилизации отходов.

5. *Смотровое окно:* Часто во время прецизионного шлифования бывает полезно обеспечить четкий просмотр образца сверху. Это осуществляется путем сошлифовки и полировки полоской области на поверхности эпоксида перпендикулярно плоскости сечения. Однако некоторые типы автоматического оборудования не позволяют закрепить образцы неправильной формы.

6. Некоторые твердые интерметаллические соединения, например, Cu_6Sn_5, Cu_3Sn, Ni_3Sn_2, Ni_3Sn_7, AuSn, $AuSn_2$, $AuSn_4$, FeSn, $FeSn_2$ и Ag_3Sn могут вызывать образование бороздок и канавок в мягкой свинцовой или свинцово-оловянной матрице при выкрашивании и прокатывании частиц. Образование бороздок и канавок сводится к минимуму перемещением или поворотом образца в направлении, противоположном вращению круга.

7.10.2.5 Полировка

Следующей за этапом шлифования стадией металлографической подготовки является полировка плоскости сечения. Полировка представляет собой продолжение абразивной обработки образца в менее жестком режиме. В состав полирующих средств могут входить алмаз, оксид алюминия, оксиды кремния или хрома. Размер частиц полирующих составов составляет от 9 мкм до 0,05 мкм, что позволяет получить однородную поверхность, не содержащую царапин. Обычно различают грубую (от 9 до 1 мкм) и тонкую (от 1 до 0,05 мкм) полировку. В течение этого этапа тоже необходимо учитывать несколько факторов:

1. *Чистота:* ПРОМЫВАЙТЕ ОБРАЗЕЦ КАК МОЖНО ЧАЩЕ. Исключительно важно поддерживать максимально возможную чистоту образца и всего, что его окружает (включая руки и рабочие столы) в течение всего времени полировки. Образец следует мыть и ополаскивать теплой мыльной водой перед началом полировки и после каждого этапа. Непродолжительная ультразвуковая очистка является наиболее эффективным средством отмывки небольших пустот типа трещин и раковин.

2. *Выбор ткани для полировки:* Основное отличие полировки от шлифования заключается в том, что шлифование осуществляется связанным абразивом, а при полировке частицы абразива свободно распределены в суспензии. Суспензия удерживается на ткани, которая определяет протяженность рельефа поверхности и качество полировки. Ткани с коротким ворсом дают более гладкую поверхность, чем ткани с длинным ворсом, но не способны удалить все трещины столь же эффективно. Специальные тонкие полировочные ткани с коротким ворсом обеспечивают получение очень гладкой поверхности, практически свободной от царапин.

3. *Полировочный наполнитель:* Наполнители при полировке играют ту же роль, что и смазочно-охлаждающая жидкость при шлифовании, способствуя удалению отходов и уменьшению выделения тепла. Наполнитель также обеспечивает однородность зернистого состава полирующей среды.

Необходимо обратить внимание на правильное содержание наполнителя. Излишки наполнителя позволяют образцу "всплывать", вызывая излишнюю рельефность. Недостаточное количество наполнителя может привести к размягчению капсулирующего материала и абсорбции полирующей среды, особенно алмазных частиц. Вид используемого наполнителя зависит от полирующей среды; обычно это деионизованная вода или специальное масло для полировки.

4. *Давление:* Нажим при полировке должен быть очень легким. Избыточное давление приведет к образованию излишней рельефности поверхности.

5. *Направление:* Грубая полировка может выполняться одним из двух способов. Лучший вариант определяется методом проб и ошибок, и в зависимости от типа образца результаты могут отличаться.

Всенаправленная полировка заключается во вращении образца по- или против направления вращения круга. При этом способе полировка выполняется по всем направлениям. При однонаправленной полировке образец удерживается в неподвижном состоянии, и все следы полировки располагаются в одном направлении. Этот способ особенно полезен для слоистых структур. Тонкая полировка почти всегда выполняется всенаправленным способом. Большинство автоматических станков работают только во всенаправленном режиме.

7.10.2.6 Травление

Травление является завершающим этапом подготовки металлографического шлифа. Перед выполнением травления образец следует проверить на наличие дефектов, включений, пористости, трещин, межкристаллитной коррозии, роста интерметаллических соединений и других аномалий. Травление удаляет тонкий слой деформации износа, вскрывая детали микроструктуры образца. Для химического воздействия на поверхность образца при травлении используются кислоты и щелочи. Для травления различных материалов существует множество видов травителей. Утилизация отходов может вызвать затруднения из-за присутствия в них тяжелых металлов, например, хроматов, и токсических веществ, в частности, пыли оксида бериллия.

Меры обеспечения безопасности приведены в ASTM E407-70. Используемые химические реактивы должны быть качества USP / NF или лучше. В публикации ITRI № 580 описаны травители, предназначенные для олова и его сплавов, а также приведены микрофотографии поверхности обработанных образцов.

Оловянно-свинцовые фазы: Ниталь (1-5 мл HNO_3 100 мл этанола (95%) или метанола (95%)). Погрузить на 5-40 секунд в 5% раствор HNO_3. Для удаления пятен погрузить на 25 секунд в 10% раствор HCl в метаноле.

Разнообразные травители

ИМС медь-олово:

95 мл H_2O
10 мл 10% хромовой кислоты
2 мл HCl
5 мл H_2SO_4

или

7 граммов $FeCl_3$
75 мл HCl
200 мл H_2O

или

100 мл H_2O
100 мл H_2O_2, 3%

или

100 мл NH_4OH, 35%
100 мл H_2O_2, 3%

Припой:

Припой можно травить химически с использованием разбавленной (не более 5%) соляной кислоты, но приемлемые результаты могут быть получены и при продолжительной окончательной полировке с исключительно слабым нажимом. Припой обладает чрезвычайно высокой реакционной способностью к большинству травителей, и поэтому необходимо соблюдать осторожность, чтобы не разрушить его структуру.

Медь:

50 мл гидроксида аммония
50 мл воды
от 3 до 5 г персульфата аммония

Нержавеющая сталь или ковар:

10 г сульфата меди
50 мл соляной кислоты
50 мл воды

7.11 Составление отчета о результатах

Во все отчеты об испытаниях в качестве составной части должны включаться следующие конструкторские, расчетные, технологические и дополнительные данные:

a) Цель испытаний и краткое описание поставленных задач, схема идентификации образцов и анализ статистических данных.

b) Подробные проектно-конструкторские сведения о тест-плате с указанием отклонений от конструкции изделия и их обоснование (доступность, цена или ускорение испытаний). Подробные сведения о составе и толщине заготовок плат/модулей, включая препрег и укладку слоев, металлы, керамика и т.д.

Особенности конструкции платы/модуля, включая: производитель, топология площадок, диаметры металлизированных отверстий и минимальная толщина стенок, толщина внутреннего и наружного слоев меди, сечение платы, включая % содержания меди, а также расположение сигнальных и заземляющих/питающих плоскостей, состав сердечника (если имеется) и КТР составной конструкции, включая КТР используемых материалов.

Особенности конструкции корпуса компонента, включая: производитель и номер детали, подготовка детали (включая операцию лужения), и описание внутренней части (последовательная или матричная конфигурация).

Особенности процесса сборки, включая: тип припоя и метод нанесения; метод установки компонентов; сушка и другие предварительные операции; метод оплавления; процесс отмывки, а также тип влагозащитного покрытия, его толщина и метод нанесения (если применяется).

Данные вспомогательных измерений (с приложением иллюстраций, если они имеются) должны включать: высоту паяного соединения (для безвыводных корпусов, если не предусмотрено конструкцией); форму галтели паяного соединения; верхнюю и нижнюю границу данных по КТР платы в направлениях X и Y, как до, так и после испытаний на термоциклирование; данные КТР корпуса.

c) Подготовка выборки/сведения о предварительной обработке (если применяется).

d) Температурные профили испытуемого образца, измеренные на образце, и протоколы испытаний камеры, демонстрирующие ее функциональные возможности.

e) Анализ данных электрического отказа, включая статистические графики, доверительные интервалы и обработку аномальных значений. Эти сведения обсуждаются в книгах "Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis" и в издававшейся ранее "Applied Life Data Analysis." Другие полезные ссылки: "Accelerated Testing Handbook," "Applied Reliability," "How to Plan and Analyze Accelerated Tests," и "How to Analyze Reliability Data."

1) Используемый метод электрических испытаний, включая способ подачи испытательного тока (непрерывно или дискретно), уровень испытательного тока, напряжение на зажимах источника тока, постоянная времени прибора для измерения напряжения или сопротивления, определение состояния "обрыв" и постоянная времени прибора для обнаружения "обрывов".

2) Рекомендуется графическое отображение данных для проверки их "доброкачественности" на глаз; пользуйтесь листами с нанесенной шкалой Вейбулла для вероятности и логарифмической шкалой для данных (время), которые можно приобрести у поставщиков или скопировать из книги. Этот графический аналитический инструмент дает возможность выполнить качественную проверку данных и дать быструю приблизительную количественную оценку различных параметров. Существуют различные методы графической обработки для данных с наблюдаемым или точным временем отказа (полного) и для данных, в которых содержится только количество отказов в течение периода наблюдений; см. "How to Plan and Analyze Accelerated Tests." Аналитические методы позволяют выявить недостоверность данных по вычислению среднеквадратических отклонений и доверительных интервалов.

3) Доверительные интервалы и границы обсуждаются в "How to Plan and Analyze Accelerated Tests" и в главе 5 книги "Accelerated Testing."

4) Анализ и обсуждение специализированной обработки "аномальных значений" (отказов, которые произошли намного раньше, чем в остальных данных для этой же нагрузки), встречающихся в данном массиве данных.

5) Обсуждение УСЕЧЕННЫХ данных, когда для некоторых из объектов испытаний ОТСУТСТВУЮТ критические данные, к которым относятся время или количество циклов до отказа; данные или испытания обрезаются справа или отбрасываются, если испытания или эксплуатация изделий прекращается до наступления отказа или в связи с какой-либо другой характеристикой отказа, либо если изделия не вышли из строя на момент завершения испытаний или анализа данных.

f) Металлографический анализ отказавших компонентов с приложением макро- и микрофотографий.

(Примечание: С образцами, отказавшими вследствие усталости, следует обращаться с исключительной осторожностью во избежание дальнейшего разрушения или загрязнения областей отказа.

НЕ "СТЫКУЙТЕ" ПОВРЕЖДЕННЫЕ ЧАСТИ В ЕДИНОЕ ЦЕЛОЕ С ЦЕЛЬЮ "РЕКОНСТРУКЦИИ" ОТКАЗА, ТАК КАК ПРИ ЭТОМ СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ИЗЛОМА МЯГКОГО ПРИПОЯ БУДЕТ ПОЛНОСТЬЮ РАЗРУШЕНА).

g) Для типичных вибрационных испытаний с регистрацией в MIL-STD-810 приводится следующий перечень:

1) Предыстория указанного объекта испытаний.

2) Порядок проведения проверки и испытаний, включая требования к контролю, критерии испытаний, измерительную аппаратуру, требования к данным и критерии отказа.

3) Перечень всего испытательного оборудования, включая оборудование для возбуждения вибраций и анализа, монтажные приспособления и крепления.

4) Ориентация объекта испытаний, включая оси приложения вибраций.

5) Положение датчиков ускорения, используемых для контроля и измерения вибраций.

6) Резонансные частоты, включая выбранные для испытаний, как соответствующие условиям.

7) Характеристики изоляции, включая зависимость амплитуды качаний и проницаемости от частоты.

8) Применяемые уровни испытаний, длительности и частотные диапазоны.

9) Результаты измерений всех технических характеристик, включая результаты испытаний в целом.

10) Анализ каждого отказа и предлагаемые меры по устранению недостатков.

11) Анализ диапазона рабочих частот.

Эти данные должны использоваться для содействия анализу характера отказов. Шлифы должны сохраняться для последующего анализа, если он потребуется.

Приложение А
Пошаговый пример

Для иллюстрации применения соотношений из разделов 4.3 - 4.5 приводится численный пример.

Предположим, имеется следующая информация:

Изделие:

Компьютер для военно-морской артиллерии — категория применения 6 в таблице 1,

Расчетная долговечность = 10 лет (N = 3650 тепловых циклов).

Ежедневные циклы внешней температуры компонентов:

ΔT = 40°C для 100 дней/год и 60°C для 265 дней/ год.

Приемлемая совокупная вероятность отказа по истечении 10 лет x = 0,5%

Самый крупный компонент с выводами:

Керамический кристаллодержатель (LCCC), имеющий 68 выводов с шагом 50 мил. α_C = 6.3 ppm/°C, рассеивающий 0,8 Вт, с боковой напайкой гибких выводов из медного сплава с диагональной жесткостью вывода K_D = 52 фунт/дюйм,

Самый крупный безвыводной компонент:

чип-конденсатор CC1820, α_C = 6,8 ppm/°C,

Подложка:

многослойная плата с низким КТР, α_S = 10,5 ppm/°C,

Влагозащитное покрытие: Эпоксидного типа с низким КТР (не рассматривается в данном анализе надежности).

Тест-платы:

Компоненты:

8 микросхем (LCCC), 68 выводов с шагом 50 мил, α_C = 6,3 ppm/°C (измеренное значение), внутреннее последовательное соединение для независимого контроля с каждой из сторон LCCC (1/4 часть LCCC), с боковой напайкой гибких выводов из медного сплава, имеющих диагональную жесткость K_D = 52 фунт/дюйм (расчетное значение), 256 чип-конденсаторов CC1820, α_C = 6.8 ppm/°C (измеренное значение), с закороткой выводов с помощью проводящей эпоксидной смолы поверх конденсатора.

Подложка:

многослойная плата FR-4, α_S = 16,0 ppm/°C (измеренное значение), для повышения несоответствия КТР и повышенного ускорения испытаний топологией предусмотрены общий заземляющий и отдельные сигнальные проводники, позволяющие осуществлять независимый контроль неразрывности цепи с каждой из сторон для каждой микросхемы и для групп по 8 чип-конденсаторов, подключенных последовательно.

Тест-платы (ТП):

не имеют влагозащитного покрытия

Параметры испытаний:

Термоциклирование от 0°C до 100°C при 24 циклов/ день, t_D = 15 мин, ΔT_e =100°C и T_{SJ} = 50°C

Оценки надежности:

По результатам ускоренных испытаний:

Микросхема (LCCC): используя уравнения 5, 12 и 14, а также следующие параметры:

(эксплуатация): $\Delta\alpha$ = 4,2 ppm/°C, t_D = 715 мин, ΔT_e = 28 и 48°C и T_{SJ} = 67 и 57°C при ΔT = 40 и 60°C, соответственно;

Таблица 1А Результаты ускоренных испытаний на надежность

	Количество циклов до наступления отказа для последовательных цепей							
№ отказа	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
1/4 LCCC	146	196	388	418	486	540	568	628
8CC1820	2718	3463	3826	4161	4387	4631	4738	5022
№ отказа	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*
1/4 LCCC	676	684	690	820	851	878	902	926
8CC1820	5206	5372	5489	5598	5823	5978	6073	6223
№ отказа	*17*	*18*	*19*	*20*	*21*	*22*	*23*	*24*
1/4 LCCC	1038	1044	1096	1122	1206	1214	1298	1350
8CC1820	6397	Испытания прекращены после 6400 циклов						
№ отказа	*25*	*26*	*27*	*28*	*29*	*30*	*31*	*32*
1/4 LCCC	1386	1480	1536	1602	1716	1840	2002	2432
8CC1820	Испытания прекращены после 6400 циклов							

$N_f(50\%)$ = 982 и 6310 ускоренных циклов до отказа для последовательных цепей боковых сторон LCCC и групп по 8 CC1820, соответственно. Применение коррекции разбивки из уравнения 16 дает $N_f(50\%)$ = 491 и 10612 ускоренных циклов до отказа для всех LCCC и CC1820, соответственно.

(испытания): $\Delta\alpha$ = 9,7 ppm/°C, t_D = 15 мин, ΔT_e = 100°C и T_{SJ} = 50°C.

=> N_f(50%) = 1500000 и 183000 циклов при ΔT = 40 и 60°C, соответственно, и применяя статистическое распределение из уравнения 4

=> N_f (0,5%) = 128000 и 15500 циклов при ΔT = 40 и 60°C, соответственно.

Чип-конденсатор CC1820: используя уравнения 5, 12 и 13, а также следующие параметры:

(эксплуатация): $\Delta\alpha$ = 3,7 ppm/°C, t_D = 715 мин, ΔT_e = 40 и 60°C и T_{SJ} = 65 и 55°C при ΔT = 40 и 60°C, соответственно,

(испытания): $\Delta\alpha$ = 9,2 ppm/°C, t_D = 15 мин, ΔT_e = 100°C и T_{SJ} = 50°C

=> N_f (50%) = 149000 и 73000 циклов при ΔT = 40 и 60°C, соответственно, и применяя статистическое распределение из уравнения 3

=> N (0,5%) = 43300 и 21400 циклов при ΔT = 40 и 60°C, соответственно.

Из прогностической модели надежности:

Микросхема (LCCC): Используя уравнение 4 и следующие параметры:

L_D = 0,674 дюйма, K_D = 52 фунт/дюйм, h = 0,005 дюйма, A = 6 x 10^6 дюйм^2, F = 1,0, β = 2, $\Delta\alpha$ = 4,2 ppm/°C, T_c = 93°C, T_S = 85°C, T_{C0} = T_{S0} = 45/25°C.

=> N_f (0,5%) = 127000 и 15500 циклов при ΔT = 40 и 60°C, соответственно

Чип-конденсатор CC1820: Используя уравнение 3 и следующие параметры:

L_D = 0,080 дюйма, h = 0,005 дюйма, F = 0,7, β = 4, $\Delta\alpha$ = 3,7 ppm/°C, T_c = T_s = 85°C $T_{c\,0}$ = $T_{s\,0}$ = 45/25°C.

=> N_f (0,5%) = 43300 и 21400 циклов при ΔT = 40 и 60°C, соответственно.

Вывод:

Отличное согласие между оценками надежности, полученными по прогнозам аналитической модели надежности и по результатам ускоренных испытаний. Оба проанализированных компонента имеют большой запас надежности для данных условий эксплуатации; система, содержащая 33 микросхемы и 100 конденсаторов CC1820 едва достигает достигает совокупной вероятности отказа порядка 0,5% после 10 лет эксплуатации.

Если бы применение влагозащитного покрытия показало в отдельных испытаниях увеличение количества циклов до наступления отказа, то количество циклов до отказа при эксплуатации изделия очевидно было бы выше, чем показано здесь.

Приложение В
Литература

Концевые сноски -

1. Wild, R.N., "1974 IRAD Study—Fatigue Properties of Solder Joints," IBM Report No. M45-74-002, Contract No. IBM 4A69, Jan. 5. 1975

2. Wild, R.N., "Some Fatigue Properties of Solders and Solder Joints," IBM Tech. Rep. 73Z000421, January 1973.

3. Engelmaier, W, "Effects of Power Cycling on Lead-less Chip Carrier Mounting Reliability and Technology," *Proc. Int. Electronics Packaging Conf. (IEPS),* San Diego, CA, November 1982, p. 15.

4. Solomon, H.D., in *Electronic Packaging: Materials and Processes,* J.A. Sartell, ed., ASM, 1986, pp. 29-47.

5. Manson, S.S., *Thermal Stress and Low Cycle Fatigue,* McGraw-Hill, New York, 1966.

6. Morrow, J.D., "Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals," ASTM STP 378, ASTM, Philadelphia, 1964, pp. 45-87.

7. Engelmaier, W, "Solder Joint Reliability, Accelerated Testing and Result Evaluation," chapter in *Solder Joint Reliability: Theory and Applications,* John Lau, *ed.,* Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.

8. Kotlowitz, R.W., "Comparative Compliance of Representative Lead Designs for Surface Mounted Components," *Proc. Int. Electronics Packaging Conf. (IEPS),* Dallas, TX, November 1988, p. 908; also in *IEEE Trans.. Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. CHMT-12,* No. 4, December 1989, p. 431.

9. Kotlowitz, R.W., "Compliance of Surface Mount Component Lead Designs with Rectangular and Circular Cross-Sections," Proc. Int. Electronics Packaging Conf. (IEPS), San Diego, CA, September 1989, p. 1071.

10. Kotlowitz, R.W., "Compliance Metrics for Surface Mount Component Lead Design, With Application to Clip-Leads," *Proc. Surface Mount Components and Technology Conf. (SMTCON),* Atlantic City, NJ, April 1991 p. 1.

11. Kotlowitz, R.W., and L.R. Taylor, "Compliance Metrics for the Inclined Gull-Wing, Spider J-Bend, and Spider Gull-Wing Lead Designs for Surface Mount Components," *Proc. 41st Electronic Components & Technology Conf,* Atlanta, GA, May 1991.

12. Engelmaier, W., "Surface Mount Solder Joint Long-Term Reliability: Design, Testing, Prediction," *Soldering & Surface Mount Technology, Vol. 1,* No. 1, February 1989, pp. 14-22; also in IPC Technical Paper IPC-TP-797, The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, Lincolnwood, IL, January 1989.

13. Hall, P.M., "Forces, Moments, and Displacements During Thermal Chamber Cycling of Leadless Ceramic Chip Carriers Soldered to Printed Boards,"

IEEE Trans. Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. CHMT-7, No. 4, December 1984, p. 314.

14. Shine, M.C., and L.R. Fox, "Fatigue of Solder Joints in Surface Mount Devices," *Low Cycle Fatigue, ASTM STP 942,* ASTM, Philadelphia, 1987, p 588.

15. Wilcox, J.R., R. Subrahmanyan, and C.-Y Li, "Thermal Stresses and Inelastic Deformation of Solder Joints," *Proc. 2nd ASM Int. Electronic Materials and Processing Congress,* ASM, 1989, p. 203.

16. Engelmaier, W, and A.I. Attarwala, "Surface Mount Attachment Reliability of Clip-Leaded Ceramic Chip Carriers on FR-4 Circuit Boards," IEEE Trans. CHMT, 12 (No. 2), June 1989, pp. 284-296; also partially in IEPS Journal, Vol. 9 (No. 4), January 1988, pp. 3-11.

17. M.A. Miner, "Cumulative Damage in Fatigue," J. Applied Mechanics, Vol. 12, 1945.

18. Clech, J-P, F.M. Langerman, and J.A. Augis, "Local CTE Mismatch in SM Leaded Packages: A Potential Reliability Concern," Proc. 40th Elec. Comp. Tech. Conf., Las Vegas, NE, May 1990, pp. 368-376.

19. Suhir, E., "Axisymmetric Elastic Deformation of a Finite Circular Cylinder with Application to Low Temperature Strains and Stresses in Solder Joints," J. Appl. Mech., Vol. 56, No. 2, June 1989, pp. 328-333.

Приложение C
Библиография

1.0 УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

Applied Life Data Analysis, Nelson, W., John Wiley & Sons, NY, 1982 ISBN-0-471-09458-7

Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis, Wayne Nelson; John Wiley & Sons, 1990; ISBN 0471-522-775

Accelerated Testing Handbook, Technology Associates, 1987

Applied Reliability, Tobias, P.A., and Trindade, D., Van Nostrand Reinhold, 1986 ISBN 0-442-28310-5

"How to Plan and Analyze Accelerated Tests" 1900, ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques, Order Entry Dept, American Society for Quality control, 310 Wisconsin Avenue., Milwaukee, WI 53203 (800) 952-6587

"How to Analyze Reliability Data," Volume 6, 1983, ASQC as above.

"Reliability Evaluation of Interconnection Products," H.M. Cohen, M.J. LuValle, J.P Mitchell, E.S. Sproles, Jr AT&T Technical Journal, July/August 1987, Vol. 66, Issue 4 Pages 71-80

IPC-PC-90 General Requirements for Implementation of Statistical Process Control

Volume 15: How to Determine Sample Size and Estimate Failure Rate in Life Testing, 1991, ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques, Order Entry Dept., American Society for Quality Control, 310 Wisconsin Avenue., Milwaukee, WI 53203 (800) 952-6587

Weibull Analysis Handbook AD/A143 100 AFWAL-TR-83-2079 NTIS Abernethy, R.B., Breneman, J.E., Medlin, C.H. and Reinman, G.L., November 1983 Pratt and Whitney Aircraft, Government Products Division United Technologies Corporation, West Palm Beach, FL

2.0 МЕТАЛЛОГРАФИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ТРАВЛЕНИЕ

Metallography of Tin and Tin Alloys, Pub # 580; International Tin Research Institute; 1982. Metallographic sectioning, polishing and etching techniques specific to tin and its alloys used in solder joints. Photomicrographs are presented with a note of the etch used.

Metallurgy of Solder Joints in Electronics, Pub # 708; International Tin Research Institute 1990; High quality photomicrographs on clay stock of sectioned and etched specimens.

Solder Joint Reliability; John Lau, Editor; Van Nostrand Reinhold; 1991; ISBN 0-442-00260-2. Chapter 6 contains photographs of intermetallic compounds and failed joints.

Metals Handbook. 9th Edition. Volume 9. Metallography and Microstructures, ASM International, 1985, ISBN 087170-015-8 (Volume 10, Materials Characterization, and Volume 12, Fractography, may also be of value for certain specimens)

"Tentative Definitions of Terms Relating to Metallography," ASTM Designation E7-90B

"Standard Methods for Microetching Metal and Alloys," ASTM Designation E407-70

"Standards Methods for Macroetching Metals and Alloys," ASTM Designation E340-68

Metallography Principles and Procedures, LECO Corporation, 1991. Contains a reprint of ASTM E407-70 as well as ASTM E340-68.

Soldering in SMT Technology #B9-B3741-X-X-7600; Siemens Aktiengesellschaft; 2/1988; A primer in soldering with colour graphics; SEM photographs on clay stock of SMT solder joints

"Cross-Section Technique of Printed Circuit Board Evaluation," James A. Nelson, Buehler LTD, 1979

IPC publications

IPC-TM-650, 2.LID "Microsectioning, Manual Method," 2.1.1.2, "Microsectioning—Automatic Technique Micro-sectioning Equipment, Alternate."

IPC-MS-810 Guidelines for High Volume Microsection

3.0 ВИБРАЦИЯ/УДАР

Vibration Analysis for Electronic Equipment, 2nd Edition, Dave S. Steinberg; J.. Wiley & Sons 1989

Cooling Techniques for Electronic Equipment, 2nd Edition, Dave S. Steinberg; Wiley Interscience, 1991, ISBN 0-471-52451-4. Chapter 8 addresses combined vibration and thermal stresses.

Shock and Vibration, 3rd Edition, Cyril M. Harris, Editor, McGraw-Hill, 1987 ISBN 0-070026801-0